

## Caracterización de materiales de almacenamiento de energía térmica para aplicaciones en edificación

**Lizana, Jesús** <sup>(1)(\*)</sup>; **Chacartegui, Ricardo** <sup>(2)</sup>; **Barrios-Padura, Ángela** <sup>(1)</sup>;  
**Valverde, José Manuel** <sup>(3)</sup>

(\*) Departamento de Construcciones Arquitectónicas I, Universidad de Sevilla, 41012 Sevilla, España, flizana@us.es, +34615991985

(1) Departamento de Construcciones Arquitectónicas I, Universidad de Sevilla, 41012 Sevilla, España

(2) Departamento de Ingeniería Energética, Universidad de Sevilla, 41012 Sevilla, España

(3) Facultad de Física, Universidad de Sevilla, 41012 Sevilla, España

**Resumen** El almacenamiento de energía térmica ofrece un gran abanico de posibilidades y beneficios para mejorar la eficiencia energética de la edificación y aumentar el uso de las energías renovables. Este artículo proporciona una visión general de los parámetros y requerimientos de los materiales de almacenamiento térmico para aplicaciones de edificación. Para ello, los principales materiales sensibles, latentes y termoquímicos en aplicaciones de baja temperatura son analizados: hasta 21°C para soluciones de refrigeración, entre 22°C y 28°C para soluciones de confort, y de más de 29°C para aplicaciones de agua caliente y calefacción. Las propiedades físicas, termodinámicas, cinéticas, químicas y económicas de los materiales convencionales y de segunda generación son evaluadas y comparadas. Las ventajas, inconvenientes y retos de las diversas alternativas son discutidas y los futuros esfuerzos de investigación necesarios son identificados. Los resultados obtenidos determinan que el almacenamiento sensible y latente constituyen soluciones atractivas hacia el desarrollo de medidas de eficiencia energética bajas en carbono. Por otro lado, los materiales termoquímicos no presentan todavía claras ventajas. A pesar de la alta densidad energética y de su capacidad de almacenamiento durante largos periodos debido a las insignificantes pérdidas de calor, actualmente ningún material satisface todos los requerimientos para aplicaciones de edificación. Mayores esfuerzos en investigación son necesarios para optimizar las condiciones de operación, la eficiencia de los ciclos de almacenamiento y los costes del material y los sistemas.

**Palabras clave** Almacenamiento térmico, Materiales, Propiedades térmicas, Aplicaciones edificatorias, Eficiencia energética.

## 1 Introducción

El sector edificación es el mayor consumidor de energía, siendo responsable de más de un tercio del consumo de energía final del mundo (International Energy Agency, 2013). En la Unión Europea, la edificación es responsable del 40% de consumo de energía (The European Parliament and the Council of the European Union, 2010), del cual la calefacción, la refrigeración y el agua caliente conforman cerca del 70%. En el camino hacia mejorar el comportamiento energético en la edificación, el despliegue de medidas de eficiencia energética basadas en almacenamiento de energía térmica (AET) ofrece un gran rango de oportunidades y beneficios para reducir el consumo energético y las emisiones (Kalaiselvam & Parameshwaran, 2014).

Las soluciones de AET pueden ser integradas en los edificios en forma de almacenamiento sensible, latente o termoquímico (Tatsidjodoung et al., 2013). Además, las aplicaciones de AET pueden ser clasificadas en activas o pasivas:

- Las soluciones pasivas se caracterizan por un intercambio de calor sin una acción mecánica, a través de la convección natural entre el ambiente interior y el material de almacenamiento (Navarro et al., 2015).
- Las aplicaciones activas se basan en un intercambio de calor a través de la asistencia de un componente mecánico (ventilador o bomba) (Navarro et al., 2016).

El uso de materiales de AET en aplicaciones pasivas permite reducir la demanda energética en edificios a través de una mayor inercia térmica, reduciendo los picos de temperatura y mejorando el confort térmico interior (Hyman, 2011; Kalaiselvam & Parameshwaran, 2014). Por otro lado, el uso de materiales de AET en aplicaciones activas permite (Hyman, 2011; International Energy Agency, 2013):

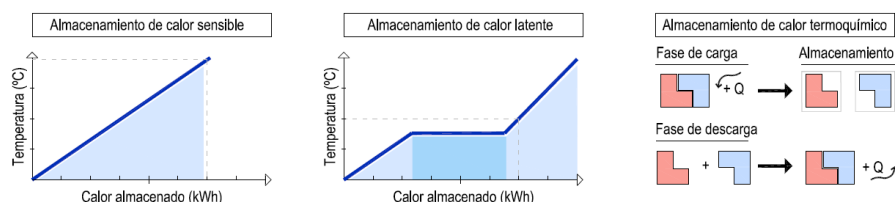
- Reducir las cargas pico de consumo gracias al suministro de energía almacenada, lo que reduce la potencia necesaria de los equipos.
- Mejorar la eficiencia de los sistemas mediante el ajuste del rango de operación (evitando cargas parciales de operación y eliminando la carga intermitente).
- Y, sobre todo, un uso más eficaz de las fuentes de energía renovables, resolviendo el desfase de tiempo entre la demanda y el período de suministro.

Este artículo se focaliza en proporcionar la definición y caracterización de las propiedades más relevantes de los materiales de AET sensibles, latentes y termoquímicos desarrollados técnica y comercialmente para aplicaciones de edificación. Ello comprende todos aquellos materiales de AET para aplicaciones de bajas temperatura: hasta 21°C para refrigeración, entre 22°C a 28°C para aplicaciones de confort, y de más de 29°C para aplicaciones de agua caliente y calefacción. Los materiales de AET disponibles son evaluados, sus propiedades son comparadas, y el estado actual de investigación es discutido, con el objetivo de identificar las ventajas, inconvenientes y desafíos. Los parámetros analizados permiten dar so-

porte al proceso de toma de decisiones en el desarrollo de soluciones de AET eficientes para los edificios.

## 2 Almacenamiento de energía térmica. Métodos y aplicaciones

El AET para aplicaciones de edificación puede basarse en métodos de almacenamiento sensible, latente o termoquímico. La Fig. 1 ilustra las diferencias entre los tres conceptos de almacenamiento. Los parámetros de caracterización y los requerimientos de cada método se definen en las siguientes secciones.



**Fig. 1** Métodos de almacenamiento de energía térmica: sensible, latente y termoquímico.

El almacenamiento de calor sensible se basa en el incremento o la disminución de temperatura del medio. El almacenamiento de calor latente se basa en el calor absorbido o liberado cuando un material experimenta un cambio de fase de un estado físico a otro (sólido-sólido, sólido-líquido o líquido-gas) (Kalaiselvam & Parameshwaran, 2014; Zhou, Zhao, & Tian, 2012). El almacenamiento de energía termoquímica se basa en el uso de una fuente de energía para inducir una reacción química reversible y/o proceso de sorción (Yu, Wang, & Wang, 2013).

Los medios de AET pueden ser implementados en edificación a través de diferentes aplicaciones. La Fig. 2 ilustra la relación entre las principales aplicaciones de AET y los métodos de almacenamiento aplicables. Las aplicaciones se dividen en: AET en materiales y componentes del edificio, sistemas de edificación activados térmicamente, componentes de AET, unidades de AET de pequeña escala y sistemas de AET a gran escala (Lizana et al., 2016).

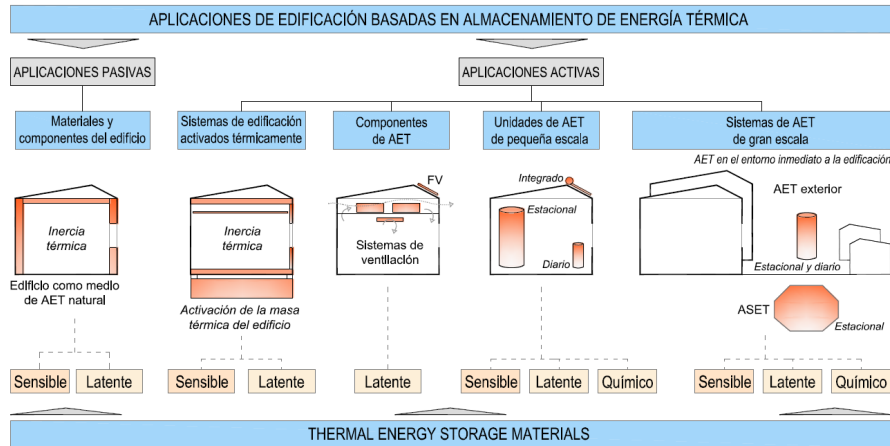


Fig. 2 Aplicaciones de edificación basadas en el almacenamiento de energía térmica.

### 3 Definición de parámetros de caracterización

#### 3.1 Materiales de AET sensible y latente

El AET sensible es la técnica más utilizada para aplicaciones de edificación. Junto a ella, la aplicación de soluciones de AET latente está creciendo gradualmente debido a que permiten almacenar grandes cantidades de energía dentro de un pequeño rango de temperatura. Los parámetros de caracterización de los materiales de AET sensible y latente, y sus influencias en las soluciones de almacenamiento térmico se enumeran en la Tabla 1 (Kalaiselvam & Parameshwaran, 2014; Mehling & Cabeza, 2008; Ståhl, 2009).

Tabla 1 Parámetros de caracterización de materiales de AET sensible y latente.

Propiedad	Medida	Influencia
Densidad ( $\rho$ )	Kg/m <sup>3</sup>	
Capacidad calorífica específica ( $c_p$ )	kJ/kg·K	Capacidad de almacenamiento térmico
Calor latente de cambio de fase ( $h$ )	kJ/kg	
Temperatura de cambio de fase	°C	Aplicación térmica
Conductividad térmica ( $\lambda$ )	W/m·°C	Tiempo de carga/descarga
Difusividad térmica	mm <sup>2</sup> /s	Capacidad de estratificación
Efusividad térmica	$W\sqrt{s} / m^2 K$	Habilidad para intercambiar energía térmica con su entorno (Ståhl, 2009)
Coefficiente de expansión térmica	%	Cambio de volumen (Requerimientos para el contenedor)
Fiabilidad térmica <sup>a</sup> (Eficiencia después de ciclos térmicos)	%	Comportamiento después de varios ciclos térmicos
Estabilidad química <sup>a</sup> (después de ciclos térmicos)	Cambios en el espectro	Descomposición del material
Estabilidad térmica <sup>b</sup> (Degradación a alta temperatura)	Pérdida de peso %	Degradación del material con el incremento de temperatura

<sup>a</sup> 5000 ciclos son requeridos para aproximadamente 13-14 años de operación (Harikrishnan et al., 2014).

<sup>b</sup> Comúnmente no importante para aplicaciones de edificación debido a la baja temperatura de operación.

La cantidad de energía almacenada en una masa de material ( $m$ ) a través del AET sensible ( $Q_s$ ) es dada por la Eq. 1, y a través de AET latente ( $Q_l$ ) por la Eq. 2 (Kalaiselvam & Parameshwaran, 2014).

$$Q_s = m c_p \Delta T \quad (\text{MJ}/\text{m}^3) \quad (1)$$

$$Q_l = m \left[ (c_{ps} \Delta T_{i...m})_{sensible} + (h)_{latente} + (c_{pl} \Delta T_{m...t})_{sensible} \right] (\text{MJ}/\text{m}^3) \quad (2)$$

Las propiedades más importantes a tener en consideración son: i) para el AET sensible: alta capacidad calorífica específica y densidad, buena conductividad térmica y bajo coste; ii) para el AET latente: temperatura de cambio de fase adecuada para la correspondiente aplicación, alto calor latente y densidad, buena conductividad térmica y bajo coste. Como valor de referencia, la capacidad de AET sensible en agua, para una diferencia de temperatura ( $\Delta T$ ) de 60°C, es de 250 MJ/m<sup>3</sup>.

Otros requerimientos y restricciones en la selección de materiales de AET sensible y latente son definidos en la Tabla 2 (Mehling & Cabeza, 2008; Tatsidjoudoung et al., 2013). Ellos se basan en aspectos de seguridad, impacto medioambiental y compatibilidad.

**Tabla 2** Requerimientos y restricciones en la selección de materiales de AET sensible y latente.

Requerimientos y restricciones	Medida	Razones
Pequeño cambio de volumen	%	Menos requisitos mecánicos del contenedor
No tóxico, no inflamable, no explosivo y no reactivo	-	Seguridad
Reciclable	%	Impacto medioambiental
No contaminante		
Baja huella ambiental	CO <sub>2</sub> -eq/kg	
No corrosivo	-	Compatibilidad con otros materiales
Disponibilidad y bajo coste	€/m <sup>3</sup> o €/kg	Competitividad y coste rentable
Fusión congruente	$\Delta T^a$ (°C)	La fusión y la solidificación se producen en un estrecho intervalo de temperatura
No sub-enfriamiento <sup>a</sup>		
No segregación o separación de fases <sup>b</sup>	-	Asegurar una larga vida útil

<sup>a</sup> El sub-enfriamiento se refiere a un líquido existente a una temperatura por debajo de su temperatura de fusión normal. Si no se alcanza esta temperatura, el PCM no se solidificará en absoluto y el calor almacenado no será liberado (Mehling & Cabeza, 2008a).

<sup>b</sup> La segregación o separación de fases se refiere a la conversión de un sistema de una sola fase en un sistema de múltiples fases (separación de componentes de una solución).

Los principales inconvenientes de almacenamiento de calor sensible están relacionados con su baja densidad energética y la auto-descarga del sistema, la cual puede ser considerable (en particular para el almacenamiento de largos periodos) (Tatsidjoudoung et al., 2013). Los principales inconvenientes del AET latente son: alto coste material, baja conductividad térmica, cambio de volumen, inflamabili-

dad, sub-enfriamiento, corrosividad, y fiabilidad y estabilidad térmica después de un gran número de ciclos de almacenamiento (Zhou et al., 2012).

### 3.2 Materiales de almacenamiento termoquímico

El almacenamiento termoquímico puede ser clasificado en reacciones químicas y/o procesos de sorción processes (Yu et al., 2013). La reacción química es caracterizada por un cambio en los enlaces químicos del compuesto implicado en la reacción (disociación y recombinación). La energía puede ser almacenada a través de la reacción endotérmica y liberada por la reacción exotérmica inversa. El almacenamiento de sorción se define como un fenómeno de fijación o captura de un gas o vapor por una sustancia sorbente en estado condensado (sólido o líquido) por medio de interacciones menos intensas. Los procesos de sorción pueden implicar aspectos termo-físicos y termoquímicos (N<sup>o</sup>Tsoukpoé et al., 2009).

Las principales ventajas del almacenamiento termoquímico son su alta densidad energética, pérdidas de calor insignificantes, y la capacidad de almacenamiento durante largos periodos. Los parámetros de caracterización de los materiales termoquímicos y sus influencias en las soluciones de AET se enumeran en la Tabla 3.

**Tabla 3** Parámetros de caracterización de materiales termoquímicos

Propiedad	Medida	Influencia
Densidad ( $\rho$ )	Kg/m <sup>3</sup>	
Calor de entrada	Wh/kg - MJ/m <sup>3</sup>	
Calor de salida (densidad de AET)	Wh/kg - MJ/m <sup>3</sup>	Capacidad de almacenamiento térmico
Eficiencia ( $Q_{\text{liberado}}/Q_{\text{almacenado}}$ )	%	
Grado de carga del sorbente en el equilibrio de adsorción/absorción	% (para sorción física)	
Temperatura de carga/desorción	°C	
Temperatura de descarga/sorción	°C	Aplicación térmica
Conductividad térmica ( $\lambda$ )	W/m·°C	
Cinética de la reacción	m/s	
Evolución de la temperatura de salida cerca del punto de equilibrio	°C	Tiempo de carga/descarga
Rango de presión de trabajo	Pa	Requerimientos del sistema
Fiabilidad térmica (Eficiencia después de ciclos térmicos)	%	Comportamiento después de varios ciclos térmicos
Estabilidad química (después de ciclos térmicos)	Cambios en el espectro	Descomposición del material después de varios ciclos térmicos
Estabilidad térmica (Degradación a alta temperatura)	Pérdida de peso %	Degradación del material con el incremento de temperatura

La energía termoquímica almacenada durante un período de tiempo específico es dada por la Eq. 3 (Kalaiselvam & Parameshwaran, 2014).

$$C_1 C_2 + Q_{input} \Rightarrow C_1 + C_2 \Rightarrow \text{Almacenamiento} \Rightarrow C_1 + C_2 \Rightarrow C_1 C_2 + Q_{output} \quad (3)$$

Otros requerimientos de los materiales termoquímicos son definidos en la Tabla 4. Ellos se basan en seguridad, impacto medioambiental y compatibilidad.

**Tabla 4** Requerimientos y restricciones en la selección de materiales termoquímicos.

Requerimientos y restricciones	Medida	Razones
No tóxico, no inflamable, no explosivo y no reactivo	-	Seguridad
No contaminante Baja huella ambiental	CO <sub>2</sub> -eq/kg	Impacto medioambiental
No corrosivo	-	Compatibilidad con otros materiales
Disponibilidad y bajo coste	€/m <sup>3</sup>	Competitividad y coste rentable
Rango de presión de operación moderado	Pa	No condiciones de presión excesivas. Menos requisitos del sistema

Los principales inconvenientes del almacenamiento termoquímico son: alto coste, temperaturas de operación inapropiadas, potencia de descarga no efectiva para aplicaciones de edificación debido a la baja cinética de la reacción y a la baja temperatura de descarga cerca del punto de equilibrio, y la baja/moderada eficiencia de los ciclos de almacenamiento.

## 4 Resultados. Caracterización de materiales de AET disponibles para aplicaciones de edificación

### 4.1 Materiales de almacenamiento de calor sensible

Los materiales de almacenamiento de calor sensible pueden ser clasificados en líquidos y sólidos (Kalaiselvam & Parameshwaran, 2014). Algunos materiales comunes de almacenamiento sólidos son rocas, piedras, ladrillos, hormigón, suelo, madera, cartón-yeso y corcho. Materiales líquidos usuales son agua o aceites, así como derivados de alcohol. La Tabla 5 resume las propiedades térmicas de los principales materiales de calor sensible, según (ISO 10456:2007; Tudela 1982).

**Tabla 5** Materiales de almacenamiento de calor sensible para aplicaciones de edificación

Referencia	Material	Propiedades			
		Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Conductividad térmica (W/m·°C)	Capacidad calorífica específica (kJ/kg·K)	Capacidad calorífica volumétrica (kJ/m <sup>3</sup> ·K)
ISO 10456:2007	Yeso (revestimiento)	1000	0,4	1	1000
	Yeso (panel)	900	0,25	1	900
(Tudela, 1982)	Ladrillo cerámico	1800	0,73	0,92	1656
	Baldosa cerámica	2000	1	0,8	1600
ISO 10456:2007	Mortero de cal	1600	0,8	1	1600
	Mortero de cemento	1800	1	1	1800
	Hormigón	2000	1,35	1	2000

Hormigón (alta densidad)	2400	2	1	2400
Hormigón armado (2%)	2400	2,5	1	2400
Madera	450	0,12	1,6	720
Madera	700	0,18	1,6	1120
Tablero contrachapado	500	0,13	1,6	800
Tablero contrachapado	1000	0,24	1,6	1600
Tablero de partículas cemento	1200	0,23	1,5	1800
OSB	600	0,14	1,7	1020
OSB	900	0,18	1,7	1530
Agua (40°C)	990	0,63	4,19	4148
Roca	2800-1500	3,5-0,85	1	2150
Caliza	1600-2600	0,85-2,3	1	2100
Arena y grava	1700-2200	2	0,910-1,180	2072
Arcilla o limo	1200-1800	1,5	1,670-2,500	3252

Los materiales sólidos son preferibles para aplicaciones de calefacción. Los lechos de roca y el hormigón pueden operar en un rango de temperatura entre 40 y 75°C (Kalaiselvam & Parameshwaran, 2014). Debido a la pobre capacidad de intercambio de calor por conducción entre materiales sólidos, la estratificación se puede mantener durante considerable período de tiempo (Tatsidjodoung et al., 2013). Sin embargo, los materiales sólidos poseen algunas limitaciones como su reducida densidad de almacenamiento comparada con el agua (alrededor de 1200kJ/m<sup>3</sup>K (Tatsidjodoung et al., 2013)), altos costes asociados durante la operación y el mantenimiento de las unidades de almacenamiento, y riesgos de auto-descarga durante largos periodos de almacenamiento.

Los líquidos son ampliamente utilizados para fines de refrigeración y calefacción. El agua es el mejor material disponible debido a su alta capacidad calorífica, disponibilidad y bajo coste. Los principales inconvenientes son el alto coste de las infraestructuras de contención y el riesgo de fugas.

## 4.2 Materiales de almacenamiento de calor latente

Los materiales de cambio de fase líquido-sólido son los más comunes empleados en edificación. Ellos se clasifican en compuestos orgánicos (parafinas, ácidos grasos, alcoholes y ésteres), compuestos inorgánicos (sales hidratadas y metales) y aleaciones eutécticas (las cuales conforman mezclas de orgánicos y/o inorgánicos) (Abhat, 1983; Zhou et al., 2012) (Fig. 3).



Fig. 3 Clasificación de materiales de cambio de fase líquido-sólido.



Las parafinas, los ácidos grasos, las sales hidratadas y las aleaciones eutécticas son los materiales más comunes empleados en edificación (Zhou et al., 2012). El uso de parafinas es derivado de sus favorables propiedades (despreciable sub-enfriamiento, no corrosividad, estabilidad química, no segregación de fases y bajo coste) (Abhat, 1983; Hasnain S.M., 1998; Tatsidjodoung et al., 2013). Las parafinas se caracterizan por una capacidad de calor latente media de  $170 \text{ MJ/m}^3$  y una conductividad térmica de  $0.2 \text{ W/mK}$  (Zhou et al., 2012). Por otro lado, las sales hidratadas tiene mayor capacidad de calor latente y mayor conductividad térmica, alrededor de  $350 \text{ MJ/m}^3$  y  $0.5 \text{ W/mK}$  respectivamente (Zhou et al., 2012)). Sin embargo, a menudo presentan algunos inconvenientes como baja fiabilidad y estabilidad térmica (Sharma, Tyagi, Chen, & Buddhi, 2009), segregación de fases, sub-enfriamiento y corrosividad (Hasnain S.M., 1998; Mehling & Cabeza, 2008; Tatsidjodoung et al., 2013). Las aleaciones eutécticas son mezclas de compuestos inorgánicos (principalmente sales hidratadas) y/o compuestos orgánicos. Una de las características más importantes de las aleaciones eutécticas son su capacidad de cambiar de fase congruentemente sin segregación (Tatsidjodoung et al., 2013).

Los ácidos grasos, los ésteres y los alcoholes son por lo general altamente inflamables, y presentan una baja conductividad térmica y un variando nivel de toxicidad (Sharma et al., 2009), por lo que su aplicación en edificación es limitada. En cuanto a los metales, a pesar de que presentan un alto calor de fusión volumétrico debido a su alta densidad (Sharma et al., 2009), y una alta conductividad térmica (Tatsidjodoung et al., 2013), su uso en edificación es limitado debido a su escasa disponibilidad y elevado coste.

En la actualidad, numerosos materiales de cambio de fase están disponibles en el mercado para el rango de temperatura entre  $-10$  y  $+120^\circ\text{C}$ . La Fig. 4 ilustra la capacidad volumétrica de calor latente y la temperatura de fusión de 250 materiales disponibles, pertenecientes a las principales empresas existentes (Tabla 6). Ellos se basan principalmente en parafinas, sales hidratadas y aleaciones eutécticas. El almacenamiento sensible en agua es también ilustrado como valor de referencia.

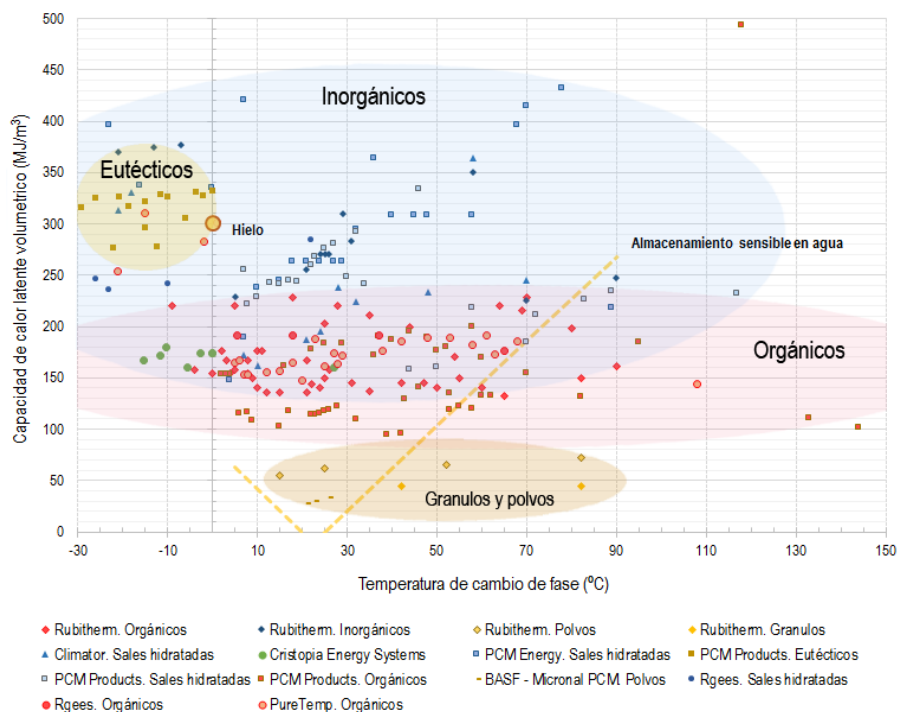


Fig. 4 Materiales de cambio de fase comerciales disponibles. Elaboración propia

Tabla 6 Principales compañías proveedoras de materiales de cambio de fase en el mundo.

Empresa	País de origen	Materiales disponibles
Rubitherm GmbH	Alemania	Orgánicos, inorgánicos, polvos y gránulos
Climator	Suecia	Sales hidratadas
Cristopia Energy Systems	India y Francia	-
PCM Energy	India	Sales hidratadas
PCM Products Ltd	Reino Unido	Eutécticos, sales hidratadas y orgánicos
BASF - Micronal PCM	Alemania	Polvos
RGees. savENRG™	EEUU	Orgánicos e inorgánicos
Entropy solutions. PureTemp	EEUU	Orgánicos

La capacidad de calor latente de los materiales inorgánicos disponibles (marcas azules) se sitúa entre 150 y 430MJ/m<sup>3</sup>. Por otro lado, la capacidad de calor latente de los materiales orgánicos disponibles se encuentra en un rango inferior, entre 100 y 250 MJ/m<sup>3</sup> (marcas rojas). El almacenamiento de calor sensible en agua, el cual es ilustrado como referencia, tiene una capacidad de almacenamiento entre 50 y 250MJ/m<sup>3</sup>, para almacenamiento de frío y calor respectivamente.

### 4.3 Materiales de almacenamiento termoquímico

Hoy en día los materiales de almacenamiento termoquímico no se encuentran disponibles comercialmente para aplicaciones de edificación. La investigación en este campo se encuentra en una etapa temprana (Tatsidjodoung et al., 2013). El alto coste material, la escasa capacidad de transferencia de masa y calor, y la densidad energética de los sistemas substancialmente inferior que la densidad energética material constituyen las principales barreras para su despliegue comercial (N'Tsoukpoe et al., 2009). Los materiales bajo investigación se focalizan principalmente hacia soluciones de almacenamiento de energía solar para largos periodos. Según la Fig. 5, los materiales termoquímicos testados en la literatura son clasificados en materiales de adsorción física, materiales de absorción líquida, y reacciones químicas a través de materiales de reacción química solidos o materiales compuestos (CSMP) (N'Tsoukpoe et al., 2009; Yu et al., 2013).

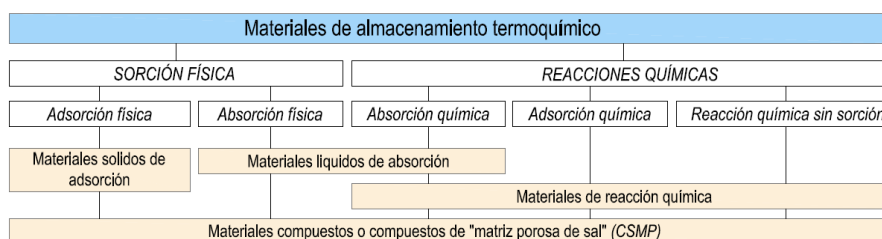


Fig. 5 Clasificación de los materiales termoquímicos para aplicaciones de edificación.

Los materiales más prometedores han sido testados a través de programas y proyectos internacionales coordinados. Algunos de estos estudios están relacionados con la Task 32 (2003-2007) (C. Bales et al., 2008; Chris Bales et al., 2008), y la Task 42 (2009-2015) (Davidson et al., 2013) en el marco del programa “Solar Heating and Cooling” de la Agencia Internacional de la Energía. Otros se enmarcan dentro de proyectos europeos como: HYDES, MODESTORE (2003-2012), MERITS (2007-20013), COMTES (2012-2016) o E-HUB (2010-2014). La Tabla 7 muestra los resultados del comportamiento de los materiales termoquímicos testados para aplicaciones de edificación.

Tabla 7 Materiales termoquímicos reportados en literatura para aplicaciones de edificación.

	Referencia	Material	Propiedades		
			Carga (°C)	Descarga (°C)	Almacenamiento volumétrico (MJ/m <sup>3</sup> )
Adsorción física sólida	<b>Modestore</b> (Chris Bales et al., 2008; Wagner, Janhig, Isaksson, & Hausner, 2006)	Gel de sílice 127B/H <sub>2</sub> O	88	70-40	180
	<b>SPF</b> (Chris Bales et al., 2008)	Zeolite 13X/ H <sub>2</sub> O	180	55	648
	<b>E-Hub project</b> (Finck et al., 2014)	Zeolite 5A/ H <sub>2</sub> O	103	53-36	170
	<b>Proyecto COMTES</b> (Helden et al., 2014)	Zeolite 13XBF/ H <sub>2</sub> O	150	75-47	277

Absorción líquida	<b>MonoSorp</b> (Chris Bales et al., 2008)	Zeolite 4A/Air	180	35-10	576
	(Zettl, Englmaier, & Steinmaurer, 2014)	Zeolite 4A/Air	180	60-35	346
			230	60-35	421
	(Johannes et al., 2015)	Zeolite NaX/Air	180	57	
			120	57	
	<b>Proyecto E-Hub</b> (Vanhoudt et al. 2014)	Zeolite 13X/Air	120-160	70-45	
	(Hauer, 2007)	Zeolite 13X/ H <sub>2</sub> O	130-180	65	446
	<b>TCA - TASK 32 - IEA-SCH</b> (Bales et al., 2008)	LiCl salt/H <sub>2</sub> O	46-87	30-25	911
	(Chris Bales et al., 2008; Weber & Dorer, 2008)	NaOH/H <sub>2</sub> O	95-150	70	900
	<b>Proyecto COMTES</b> (Berg Johansen & Furbo, 2015; Daguene-Frick et al., 2014)	NaOH/H <sub>2</sub> O	95	32,8 o 56	
(Davidson et al., 2013; Quinnell et al., 2012)	CaCl <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O	117-138		382-1372	
(N'Tsoukpoe, Le Pierrès, & Luo, 2013)	LiBr/H <sub>2</sub> O	75-90	30-40		
Reacción química	TASK 32 - IEA-SCH (Chris Bales et al., 2008)	MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	150		1512
	<b>Dutch WAELS project</b> (van Essen et al., 2009)	MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	60-275	25	1800
	<b>Proyecto E-hub</b> (Vanhoudt et al., 2014; Zondag et al., 2013)	MgCl <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O	130	64-50	500
	<b>MCES</b> (Lammak et al., 2004)	Na <sub>2</sub> S-graphite/H <sub>2</sub> O	80-95		
CSPM	<b>SWEAT</b> (de Boer et al., 2004)	Na <sub>2</sub> S-cellulose/H <sub>2</sub> O	>83	45-35	
	(Mauran, Lahmidi, & Goetz, 2008)	SrBr <sub>2</sub> -ENG/H <sub>2</sub> O	80	35	216
	<b>Adv. CWS-NT. Combisystem</b> (Davidson et al., 2013; Mette et al., 2013)	Zeolite 4A-CaCl <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O	130	25	900

El gel de sílice 127B y zeolites (4A, 5A, 13X y NaX) han sido testados en ciclos abiertos y cerrados de adsorción física. El gel de sílice 127B/H<sub>2</sub>O ha sido estudiado a través de un ciclo de adsorción cerrado en los proyectos HYDES y MODESTORE (2003-2012). Los resultados mostraron que el sistema de gel de sílice/agua tiene que operar entre un contenido de agua del 3 al 13%, lo que redujo su capacidad real de AET. Por lo tanto, para lograr una capacidad de almacenamiento de energía estacional real, grandes volúmenes de almacenamiento son necesarios. Zeolite 13X ha sido identificado como uno de los mejores adsorbentes debido a su elevada absorción de agua, lo que le proporciona una alta densidad de AET. Por ello, este material ha atraído el interés de los investigadores, haciendo que la mayor parte de los proyectos de demostración actuales se basen en él, como el proyecto E-Hub (2010-2014) o el proyecto COMTES (2012-2016). Junto a él, nuevos materiales porosos sólidos para procesos de adsorción han sido propuestos para aplicaciones de AET, como los aluminofosfatos (AlPOs), los silico-aluminofosfatos (SAPOs) y los marco órgano-metálicos (MOFs). Sin embargo, su elevado coste de producción es la principal barrera para su implementación (Yu et al., 2013).

Materiales líquidos como LiCl, NaOH, CaCl<sub>2</sub> y LiBr han sido testados en ciclos cerrados de absorción. Estos materiales de absorción líquidos presentan valores de densidad energética más altos que los materiales de adsorción sólidos, con

temperaturas en un rango adecuado para aplicaciones de edificación. Además, los desecantes líquidos pueden ser bombeados y utilizarse directamente como fluido de transferencia de calor.

Los materiales de reacción química como el sulfato de magnesio ( $MgSO_4$ ) o el cloruro de calcio ( $CaCl_2$ ) poseen mayor densidad de AET que los materiales previos analizados. Sin embargo, los resultados de sus evaluaciones han mostrado velocidades de reacción muy lentas, asociadas con bajas elevaciones de temperatura en el reactor (Mette et al., 2013) y baja estabilidad química tras la consecución varios ciclos térmicos (Vanhoudt et al., 2014). Con el fin de mejorar las propiedades del material de almacenamiento termoquímico, y en particular para mejorar la velocidad de reacción y la liberación de calor, una nueva familia de sorbentes compuestos, denominados compuestos de "matriz porosa de sal" (CSPM), ha sido propuestos recientemente. Estos materiales compuestos se basan en dos sorbentes: el matriz huésped con estructura porosa y de alta conductividad térmica para mejorar la velocidad de reacción y, por lo tanto, la liberación de calor (zeolite, gel de sílice, alúmina, vermiculita expandida, aerogel, etc.), y una solución de sal inorgánica ( $LiCl$ ,  $CaCl_2$ ,  $MgCl_2$ ,  $MgSO_4$ ,  $Ca(NO_3)_2$ ,  $LiNO_3$ , etc.), localizada dentro de la matriz, que aumenta la densidad de almacenamiento.

Teniendo en cuenta todos los materiales termoquímicos analizados, a pesar de su alta densidad energética, no existe actualmente material que satisfaga todos los requisitos para su aplicación eficiente en el sector de la edificación. El alto coste, las bajas capacidades de descarga, la potencia variable en el tiempo, y la fiabilidad y estabilidad térmica después de varios ciclos térmicos constituyen cuestiones comunes a resolver. Además, la densidad energética de los prototipos de almacenamiento finales ha resultado significativamente inferior a la densidad de almacenamiento de los materiales (en más de un 50% (K. Edem N'Tsoukpoe et al., 2009)).

## 5 Conclusiones

El almacenamiento de energía térmica a través de materiales de almacenamiento de calor sensible y latente es identificado como una estrategia atractiva hacia la consecución de edificios de alta eficiencia energética. La evaluación de las características de los materiales existentes nos permite concluir que:

- El agua y los materiales subterráneos son en la actualidad los mejores materiales disponibles debido a su alta capacidad de almacenamiento sensible y su difusividad térmica moderada. Además, las soluciones subterráneas muestran el beneficio de usar la tierra como aislamiento, lo cual permite almacenar la energía térmica de forma más eficiente durante largos periodos de tiempo.
- Actualmente existe un gran número de materiales de almacenamiento de calor latente disponibles comercialmente. Los materiales de cambio de fase basados en sales hidratadas constituyen los mejores materiales existentes debido a su alta

capacidad de almacenamiento de calor latente volumétrico y su alta conductividad térmica. Sin embargo, mayores consideraciones sobre su estabilidad a largo plazo, y otras cuestiones que afectan a la seguridad, fiabilidad y practicabilidad deben considerarse.

En cuanto a los materiales de almacenamiento termoquímico, a pesar de su alta densidad energética y su capacidad de almacenamiento durante largos períodos sin pérdidas, actualmente no hay material que satisfaga todos los requisitos para una implementación viable. El almacenamiento termoquímico no es lo suficientemente maduro para aplicaciones de edificación. Se requieren esfuerzos de investigación adicionales para optimizar las condiciones de operación, la eficiencia de los ciclos de almacenamiento, el coste del material y el diseño de sistemas. Además, las soluciones termoquímicas requieren diferentes tanques e intercambiadores, lo cual reduce significativamente la densidad de almacenamiento final y aumenta los costes, lo cual debe ser considerado con atención para aplicaciones a pequeña escala.

**Agradecimientos** Los autores desean agradecer al Ministerio de Educación, Cultura y Deporte de España por el apoyo financiero a través del contrato de investigación FPU concedido a Francisco Jesús Lizana Moral (FPU14/06583).

## Referencias

- Abhat, A. (1983). Low temperature latent heat thermal energy storage: Heat storage materials. *Solar Energy*, 30(4), 313–332.
- Bales, C., Gantenbein, P., Jaehnig, D., Kerskes, H., van Essen, M., Weber, R., & Zondag, H. (2008). Chemical and Sorption Storage. In *EUROSUN 2008. 1st International Congress on Heating, Cooling, and Buildings*. Lisbon, Portugal.
- Bales, C., Gantenbein, P., Jaenig, D., Kerskes, H., Summer, K., Van Essen, M., & Weber, R. (2008). Laboratory Tests of Chemical Reactions and Prototype Sorption Storage Units. *A Report of IEA Solar Heating and Cooling Programme - Task 32: Advanced Storage Concepts for Solar and Low Energy Buildings*. Retrieved from <http://drxvzvm.iea-shc.org/data/sites/1/publications/task32-b4.pdf>
- Berg Johansen, J., & Furbo, S. (2015). COMTES - Deliverable 5.1□: Description of experimental systems. Retrieved from <http://comtes-storage.eu/wordpress/wp-content/uploads/2015/06/D5-1-final-Description-of-experimental-systems.pdf>
- Daguenet-Frick, X., Gantenbein, P., Frank, E., Fumey, B., Weber, R., & Williamson, T. (2014). Seasonal Thermal Energy Storage with Aqueous Sodium Hydroxide. Reaction Zone development, manufacturing and first experimental assessments. In *EuroSun 2014. ISES Conference Proceedings*. Aix-les-Bain, France. <http://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.251>
- Davidson, J. H., Quinnell, J., Burch, J., Zondag, H. a, Boer, R. De, Finck, C., ... Bertsch, F. (2013). Development of Space Heating and Domestic Hot Water Systems with Compact Thermal Energy Storage. In *Compact Thermal Energy Storage: Material Development for System Integration*. Report of the IEA SHC/ECES programme - Task 42/Annex 24. Retrieved from <http://www.iea-shc.org/task42> [accessed April 2015]
- de Boer, R., Haije, W. G., Veldhuis, J. B. J., & Smeding, S. F. (2004). Solid-sorption cooling with integrated thermal storage: the SWEAT prototype. In *Proceedings of HPC 2004-3rd International Heat Powered Cycles Conference*. Larnaca, Cyprus.

- Finck, C., Henquet, E., Van Soest, C., Oversloot, H., De Jong, A. J., Cuypers, R., & Van T'Spijker, H. (2014). Experimental results of a 3 kWh thermochemical heat storage module for space heating application. *Energy Procedia*, 48(0), 320–326. <http://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.02.037>
- Harikrishnan, S., Deenadhayalan, M., & Kalaiselvam, S. (2014). Experimental investigation of solidification and melting characteristics of composite PCMs for building heating application. *Energy Conversion and Management*, 86, 864–872. <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.06.042>
- Hasnain S.M. (1990). *Latent heat thermal energy storage for solar heating applications*. University of Leeds.
- Hasnain S.M. (1998). Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: heat storage materials and techniques. *Energy Conversion and Management*, 39(11), 1127–1138. [http://doi.org/10.1016/S0196-8904\(98\)00025-9](http://doi.org/10.1016/S0196-8904(98)00025-9)
- Hauer, A. (2007). Adsorption Systems for Tes—Design and Demonstration Projects. In *Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption* (Vol. 13, pp. 409–427). Netherlands: Springer. [http://doi.org/10.1016/0378-7788\(89\)90020-0](http://doi.org/10.1016/0378-7788(89)90020-0)
- Helden, W. Van, Wagner, W., Schubert, V., Krampe-Zadler, C., Kerskes, H., Bertsch, F., ... Jänchen, J. (2014). Experimental tests on a solid sorption prototype for seasonal solar thermal storage. *Eurotherm Seminar #99: Advances in Thermal Energy Storage*, 1–8.
- Hyman, L. (2011). Overview. In *Sustainable Thermal Storage Systems: Planning, Design, and Operations* (pp. 1–23). The McGraw-Hill.
- International Energy Agency. (2013). *Transition to Sustainable Buildings. Strategies and Opportunities to 2050*. OECD/IEA. <http://doi.org/10.1787/9789264202955-en>
- ISO 10456:2007. Building materials and products. Hygrothermal properties. Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values. (2007).
- Johannes, K., Kuznik, F., Hubert, J.-L., Durier, F., & Obrecht, C. (2015). Design and characterisation of a high powered energy dense zeolite thermal energy storage system for buildings. *Applied Energy*, 159, 80–86. <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.08.109>
- Kalaiselvam, S., & Parameshwaran, R. (2014). Chapter 3: Thermal Energy Storage Technologies. In *Thermal energy storage technologies for sustainability: systems design, assessment, and applications* (1st ed., pp. 57–64). Academic Press.
- Kalaiselvam, S., & Parameshwaran, R. (2014). Chapter 4: Sensible Thermal energy Storage. In *Thermal energy storage technologies for sustainability: systems design, assessment, and applications* (1st ed., pp. 65–81). Academic Press.
- Kalaiselvam, S., & Parameshwaran, R. (2014). Chapter 5: Latent Thermal energy Storage. In *Thermal energy storage technologies for sustainability: systems design, assessment, and applications* (1st ed., pp. 83–126). Academic Press.
- Kalaiselvam, S., & Parameshwaran, R. (2014). Chapter 6: Thermochemical energy storage. In *Thermal energy storage technologies for sustainability: systems design, assessment, and applications* (1st ed., pp. 127–144). Academic Press.
- Kalaiselvam, S., & Parameshwaran, R. (2014). *Thermal energy storage technologies for sustainability: systems design, assessment, and applications* (1st ed.). Academic Press.
- Lammak, K., Wongsuwan, W., & Kiatsiriroj, T. (2004). Investigation of modular chemical energy storage performance. In *Proceedings of the Joint International Conference on Energy and Environment*. Hua Hin, Thailand;
- Lizana, J., Chacartegui, R., Barrios-Padura, Á., Ortiz, C., & Vilches, A. (2016). Evaluation of thermal energy storage technologies for heating, cooling and hot water applications road to zero energy buildings. In *Proceedings of the 11th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment systems, SDEWES2016.0106* (pp. 1–16). Lisbon.
- Mauran, S., Lahmidi, H., & Goetz, V. (2008). Solar heating and cooling by a thermochemical process. First experiments of a prototype storing 60 kWh by a solid/gas reaction. *Solar Energy*, 82, 623–636. <http://doi.org/10.1016/j.solener.2008.01.002>
- Mehling, H., & Cabeza, L. F. (2008a). *Heat and cold storage with PCM. An up to date introduction into basics and applications*. Springer.

- Mehling, H., & Cabeza, L. F. (2008b). Solid-liquid phase change materials. In *Heat and cold storage with PCM. An up to date introduction into basics and applications*. (pp. 11–55). Springer.
- Mette, B., Kerskes, H., Drück, H., & Müller-Steinhagen, H. (2013). New highly efficient regeneration process for thermochemical energy storage. *Applied Energy*, *109*, 352–359. <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.01.087>
- N'Tsoukpoe, K. E., Le Pierrès, N., & Luo, L. (2013). Experimentation of a LiBr-H<sub>2</sub>O absorption process for long-term solar thermal storage: Prototype design and first results. *Energy*, *53*, 179–198. <http://doi.org/10.1016/j.energy.2013.02.023>
- N'Tsoukpoe, K. E., Liu, H., Le Pierrès, N., & Luo, L. (2009). A review on long-term sorption solar energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *13*(9), 2385–2396. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2009.05.008>
- Navarro, L., de Gracia, A., Niall, D., Castell, A., Browne, M., McCormack, S. J., ... Cabeza, L. F. (2015). Thermal energy storage in building integrated thermal systems: A review. Part 2. Integration as passive system. *Renewable Energy*. <http://doi.org/10.1016/j.renene.2015.06.064>
- Navarro, L., Gracia, A. De, Niall, D., Castell, A., Browne, M., McCormack, S. J., ... Cabeza, L. F. (2016). Thermal energy storage in building integrated thermal systems: A review. Part 1. Active storage systems. *Renewable Energy*, *88*(forthcoming), 526–547. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.11.040>
- Quinnell, J. A., & Davidson, J. H. (2012). Mass transfer during sensible charging of a hybrid absorption/sensible storage tank. *Energy Procedia*, *30*, 353–361. <http://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.11.042>
- Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *13*(2), 318–345. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2007.10.005>
- Ståhl, F. (2009). *Influence of thermal mass on the heating and cooling demands of a building unit*. PhD thesis. Sweden: Chalmers University of Technology. Retrieved from <http://publications.lib.chalmers.se/publication/102603-influence-of-thermal-mass-on-the-heating-and-cooling-demands-of-a-building-unit>  
<http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/102603.pdf>
- Tatsidjodoung, P., Le Pierrès, N., & Luo, L. (2013). A review of potential materials for thermal energy storage in building applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *18*, 327–349. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.025>
- The European Parliament and the Council of the European Union. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the Energy Performance of Building (recast) (2010). Official Journal of the European Union.
- Tudela, F. (1982). *Ecodiseño*. Universidad Autónoma Metropolitana de Xochimilco.
- van Essen, V. M., Zondag, H. A., Gores, J. C., Bleijendaal, L. P. J., Bakker, M., Schuitema, R., ... Rindt, C. C. M. (2009). Characterization of MgSO<sub>4</sub> Hydrate for Thermochemical Seasonal Heat Storage. *Journal of Solar Energy Engineering*, *131*(4), 1–7. <http://doi.org/10.1115/1.4000275>
- Vanhoudt, D., Claessens, B., De Ridder, F., Reynders, G., Cuypers, R., Oversloot, H., ... Zondag, H. (2014). Energy-Hub for residential and commercial districts and transport. D3.2 Report on a combination of thermal storage techniques and components. Report of EU project (7FP).
- Wagner, W., Janhig, W., Isaksson, D., & Hausner, R. (2006). Modularer energiespeicher nach dem sorptionprinzip mit hoher energiedichte – Modestore, Technology report. Technology report, AEE Institute für Nachhaltige Technologien.
- Weber, R., & Dorer, V. (2008). Long-term heat storage with NaOH. *Vacuum*, *82*(7), 708–716. <http://doi.org/10.1016/j.vacuum.2007.10.018>
- Yu, N., Wang, R. Z., & Wang, L. W. (2013). Sorption thermal storage for solar energy. *Progress in Energy and Combustion Science*, *39*(5), 489–514. <http://doi.org/10.1016/j.pecs.2013.05.004>  
Review
- Zettl, B., Englmaier, G., & Steinmaurer, G. (2014). Development of a revolving drum reactor for open-sorption heat storage processes. *Applied Thermal Engineering*, *70*(1), 42–49. <http://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.04.069>



- Zhou, D., Zhao, C. Y., & Tian, Y. (2012). Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. *Applied Energy*, *92*, 593–605. <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.08.025>
- Zondag, H., Kikkert, B., Smeding, S., Boer, R. de, & Bakker, M. (2013). Prototype thermochemical heat storage with open reactor system. *Applied Energy*, *109*, 360–365. <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.01.082>