

COSTOS DE LAS TECNOLOGÍAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA TÉRMICA

COSTS OF THERMAL ENERGY STORAGE TECHNOLOGIES

Debrayan Bravo Hidalgo^{}, Jorge González Alonso¹ y Yomayki Martínez Pérez¹*

¹ *Research Management Learning (RML). Av. América N21-121 y Av. Universitaria. Quito. Ecuador.
Código postal: 170150*

Recibido: Marzo 23, 2017; Revisado: Abril 19, 2017; Aceptado: Junio 6, 2017

RESUMEN

Las instalaciones de acumulación térmica permiten disponer de energía en ausencia de luz solar. Este hecho atenúa la dificultad que representa la intermitencia en la incidencia del astro rey en el planeta. La tecnología de acumulación térmica también ayuda a suavizar las fluctuaciones en la demanda de energía durante diferentes períodos del día. Esta contribución identifica las naciones con mayores resultados investigativos en esta temática; así como las principales líneas de investigación que hoy día se desarrollan. Se presenta un compendio de varios materiales de almacenamiento de energía térmica, sus costos actuales por unidad de masa y las propiedades físico químicas de estos. Las técnicas de implementación de las tecnologías de acumulación térmicas pueden catalogarse como áreas de alta, media y baja temperatura. En el área de alta temperatura, los materiales inorgánicos como las sales de nitrato son los materiales de almacenamiento de energía térmica más utilizados, mientras que, en las áreas de media e inferior temperatura, los materiales orgánicos como la parafina comercial son más comunes. En la actualidad una de las tendencias investigativas en esta temática son los proyectos dirigidos a la optimización de las características química y física de los materiales de almacenamiento térmico, debido a que el éxito de cualquier tecnología de acumulación termo energética tiene una fuerte dependencia del costo de los materiales seleccionados para el almacenamiento térmico.

Palabras clave: energía solar, almacenamiento de energía térmica, costos

Copyright © 2017. Este es un artículo de acceso abierto, lo que permite su uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

* Autor para la correspondencia: Debrayan Bravo, Email: dbravo@rmlconsultores.com

ABSTRACT

Thermal accumulation facilities allow energy to be available in the absence of sunlight. This fact reduces the difficulty of the intermittence in the incidence of the king star in our planet. Thermal accumulation technology also contributes to smooth the fluctuations in energy demand during different times of the day. This contribution identifies the nations with the most favorable research results in this area; as well as the main research lines that are being developed today. A compendium of various thermal energy storage materials, their current costs per unit mass, and their physical properties are presented. Techniques for implementing thermal accumulation technologies can be classified as areas of high, medium and low temperature. In the high temperature area, inorganic materials such as nitrate salts are the most widely used thermal energy storage materials, while in the medium and lower temperature areas; organic materials such as commercial paraffin are more common. Currently, one of the research trends in this area are the projects aimed at optimizing the chemical and physical characteristics of thermal storage materials, because the success of any thermos-energetic storage technology has a strong dependence on the cost of the materials selected for thermal storage.

Key words: solar energy, thermal energy storage, costs

1. INTRODUCCIÓN

Las aplicaciones de energía solar se encuentran en muchos aspectos de la vida cotidiana, como el calentamiento, climatización de las viviendas y el suministro de agua caliente sanitaria. Un inconveniente importante de la energía solar es la intermitencia (Vijayakumar et al., 2005). Para mitigar este problema, la necesidad de un sistema de almacenamiento de energía surge en la mayoría de las áreas donde se utiliza la energía solar. Existen diferentes tipos de soluciones de almacenamiento de energía (Chen et al., 2009). Uno de los campos más importantes para la aplicación de energía solar es la generación de energía eléctrica. Donde el sistema de almacenamiento de energía más adecuado depende del tipo de tecnología adoptada para la generación de electricidad. Para la generación de energía eléctrica a partir de la energía solar, existe la posibilidad de elegir entre la energía fotovoltaica y la energía solar concentrada (Köberle et al., 2015; Xu et al., 2015). La tecnología fotovoltaica generalmente almacena energía eléctrica como energía química en baterías (Shivashankar et al., 2016) mientras que la técnica de energía solar concentrada utiliza sistemas de acumulación térmica para almacenar energía solar en forma de energía térmica. Se han hecho muchas comparaciones entre distintas tecnologías de almacenamiento de energía (Chen et al., 2009). A gran escala, los sistemas de acumulación térmica de alta temperatura resultan ser más adecuadas que la tecnología de baterías. Sin embargo, debido a la caída de los precios de las células fotovoltaicas, hay una mayor competencia de la tecnología fotovoltaica frente a la tecnología de energía solar concentrada (Köberle et al., 2015). Aunque la eficiencia global de los sistemas energía solar concentrada depende del rendimiento de todos los componentes tales como colectores, receptores, sistema de almacenamiento de energía térmica, intercambiadores de calor, turbinas y generadores; el desempeño del sistema de almacenamiento térmico es el elemento más significativo

(Khalifa et al., 2016). Por lo tanto, el progreso en la eficiencia de las tecnologías de acumulación térmica y la reducción en el costo son las paridades investigativas de este tipo de instalación.

Este trabajo resume las características de implementación de esta tecnología y costo de diferentes materiales de almacenamiento de energía térmica. Estos materiales y sus propiedades son el factor de mayor incidencia en función de la eficiencia y costos de la tecnología de acumulación térmica.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se enfoca en la investigativa de una vasta documentación bibliográfica sobre los distintos tipos de materiales de almacenamiento de energía térmica y su importe económico.

La investigación se llevó a cabo, mediante el empleo del directorio académico Scopus. Esta potente herramienta permite establecer, para una búsqueda dada, los artículos más citados en la temática tratada.

La búsqueda preliminar arrojó un total de 380 publicaciones de esta temática dentro del directorio Scopus, a partir del año 1998 a la actualidad. De estas se seleccionaron 19 ya que son las publicaciones que relacionan la incidencia económica de diferentes materiales de almacenamiento de energía térmica.

A través del mencionado análisis se determina en este trabajo, cuales son los países que más resultados poseen en las investigaciones de la tecnología de almacenamiento de energía térmica, las áreas tecnológicas de mayor aplicabilidad, y por último los costos por unidad de masa de diferentes materiales de almacenamiento de energía térmica.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Un sistema de acumulación térmica consta de tres partes: medio de almacenamiento, intercambiador de calor y tanque de almacenamiento. El medio de almacenamiento puede ser por calor sensible, calor latente o material de almacenamiento termoquímico (Kuravi et al., 2013).

El propósito del intercambiador de calor es suministrar o extraer calor del medio de almacenamiento. El tanque de almacenamiento contiene el medio de almacenamiento y aísla el sistema de los alrededores. Los sistemas de acumulación térmica deben ser diseñados para cumplir con ciertos criterios, que dependen del tipo, tamaño y diseño de la aplicación con instalación que operara (Kuravi et al., 2013).

Antes de elegir un sistema de almacenamiento de energía térmica adecuado, es necesario realizar un análisis exhaustivo de todos los requisitos. El sistema de acumulación tiene que ser compatible con todas las otras unidades de la instalación; además, debe ajustarse a la estrategia operacional global de la instalación, como el rango de temperaturas operativas, el número de horas de almacenamiento requerido, la tasa de carga y descarga, la integración con el sistema de recolección solar, etc. Deberá garantizar su estabilidad a largo plazo, es decir, el número de ciclos que tanto el contenedor como el medio de almacenamiento pueden soportar sin la degradación de sus propiedades (Zhou et al., 2017). La estabilidad a largo plazo del sistema puede verse comprometida por dos factores, la escasa estabilidad de las

propiedades de los materiales sometidos a ciclos térmicos extensivos y/o corrosión e incompatibilidad química entre los materiales de cambio de fase y su recipiente (Ruiz-Cabañas et al., 2017). Por consiguiente, debe elegirse el material de almacenamiento más adecuado, el intercambiador de calor entre el material de almacenamiento térmico y el fluido de transferencia de calor.

En la figura 1 se muestra las naciones con mayor número de investigaciones en revistas de alto impacto, en el área de las tecnologías de almacenamiento de energía térmica.

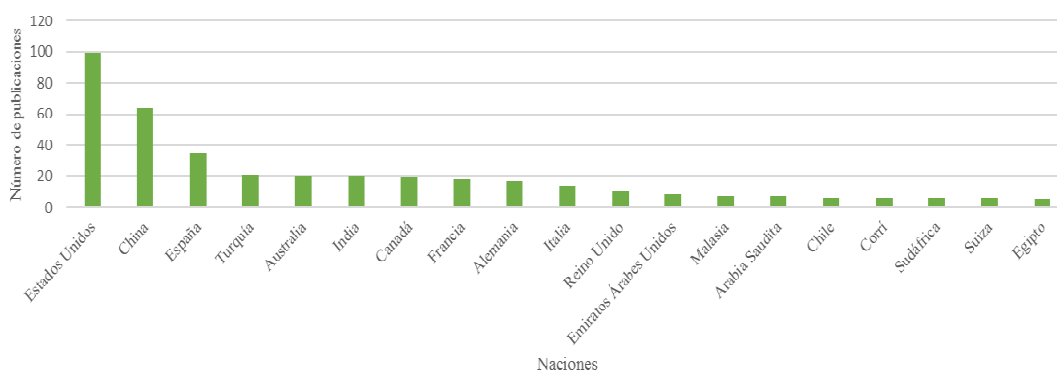


Figura 1. Representación de investigaciones en tecnologías y sistemas de almacenamiento de energía térmica, por países

Las naciones que presentan los mayores consumos de energía ven una alternativa fiable, eficiente y económica en las prácticas de almacenamiento de energía.

Las principales líneas de investigación donde se están desarrollando estas técnicas y sistemas de acumulación térmica se muestran en la figura 2.

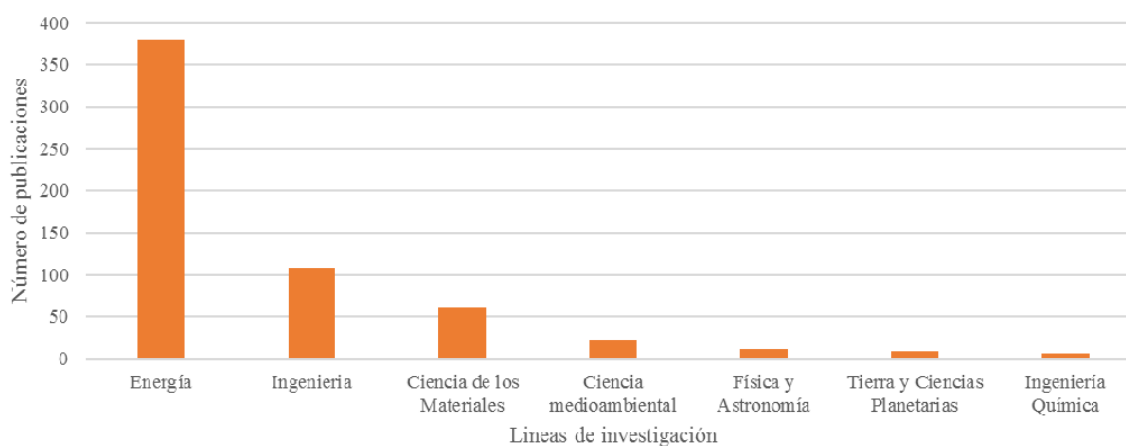


Figura 2. Representación de publicaciones en tecnologías y sistemas de almacenamiento de energía térmica, por líneas de investigación

Como se puede observar los trabajos más populares se reflejan en investigaciones en el área de la energética (Ahmed et al., 2017). Las investigaciones en ingeniería están dirigidas a las características constructivas y las combinaciones de operación óptimas en las instalaciones térmicas, ya sea de calefacción, climatización, o potencia (Rodríguez et al., 2016).

Los proyectos dirigidos a la optimización de las características químicas y físicas de los materiales de almacenamiento térmico, son una línea de investigación que reporta un gran número de resultados en la última década (Tay et al., 2016).

El éxito de cualquier tecnología de almacenamiento de energía térmica tiene una fuerte dependencia del costo de la tecnología seleccionada. Para la aplicación a alta temperatura del almacenamiento de energía térmica, la evaluación de costos puede realizarse dentro del marco de los modelos de costo de energía nivelada (Levelized Cost of Energy LCOE). En el caso de almacenamiento de energía térmica de baja temperatura para aplicaciones como calefacción o enfriamiento en edificios, se puede hacer un análisis del Ciclo de Vida para estimar el costo sobre la vida útil total del sistema.

El Departamento de Energía de EE.UU. y el Laboratorio Nacional de Energías Renovables han publicado modelos LCOE para estimar el costo de capital y el costo operacional de las instalaciones térmicas con concentradores solares y sistemas de acumulación térmica. LCOE se expresa en unidades como \$/MWh. Para el sistema de almacenamiento de energía térmica, las principales fuentes de costo son: el material de almacenamiento, el contenedor, la encapsulación y los gastos generales. Haciendo referencia al trabajo (Nkhonjera et al., 2016) para un ejemplo de análisis de costos de instalaciones de captación de energía solar con concentradores acoplados a sistemas de almacenamiento de energía térmica. Se puede apreciar que LCOE depende de muchos parámetros de entrada diferentes y específicos para un diseño de instalación particular. Para lograr la estimación exacta del importe económico se necesita un análisis de costos detallado para los diseños específicos de la planta o instalación. Un parámetro de entrada importante es el precio por unidad de masa de material de almacenamiento de energía térmica utilizado, que se expresa en \$/kg. La tabla 1 muestra el costo por unidad de masa de diferentes materiales de almacenamiento de energía térmica junto con otras propiedades del material. El empleo de las siguientes reglas permite entender cómo las propiedades de los materiales refieren el costo total.

- a) A una mayor densidad, el calor latente de fusión y el calor específico del material de almacenamiento dan como resultado una mayor densidad de almacenamiento de energía que reduce las dimensiones del recipiente. Esto reduce la parte del costo del contenedor, por lo que el costo de capital disminuye.
- b) A una menor conductividad térmica se requiere un aumento de la conductividad térmica a través de métodos como la encapsulación. Este proceso incrementa el costo capital del sistema.

Tabla 1. Costo por unidad de masa de diferentes materiales de almacenamiento de energía térmica

<i>Categoría</i>	<i>Material de almacenamiento</i>	<i>Costo por unidad de masa \$/kg</i>	<i>Temperatura de fusión⁰C</i>	<i>Densidad Kg/m³</i>	<i>Calor latente de fusión kJ/kg</i>	<i>Capacidad calorífica específica kJ/(kgK)</i>	<i>Conductividad térmica W/(m K)</i>	<i>Referencia Bibliográfica</i>
Sales de nitrato	NaNO ₃	0,4	306	2261	172	1655	0,514	(Cárdenas y León, 2013; Liu et al., 2012)
	KNO ₃	0,9	335	2109	266	0,953	0,5	(Liu et al., 2012)
Sales de hidróxido	NaOH	0,35	318	2100	165	0,92		(Liu et al., 2012)
	KOH	1	380	2040	150	1,34	0,5	(Gil et al., 2010; Liu et al., 2012)
Sales de cloruro	NaCl	0,1	802	2160	420	5,0	5	(Gil et al., 2010; Liu et al., 2012)
	KCl	0,5	771	1980	353	-	-	(Cárdenas y León, 2013; Liu et al., 2012)
	MgCl ₂	0,1	714	2320	452	-	-	(Cárdenas y León, 2013; Liu et al., 2012)
	LiCl	10	610	2070	441	-	-	(Cárdenas y León, 2013)
	CaCl ₂	0,15	772	2150	253	-	-	(Cárdenas y León, 2013)
Sales de flúor	LiF	0,5	850	2640	1044	-	-	(Cárdenas y León, 2013; Gil et al., 2010)
	NaF	0,9	996	2558	794	-	-	(Cárdenas y León, 2013)
	KF	0,1	858	2370	468	-	-	(Cárdenas y León, 2013)

	CaF ₂	0,35	1418	3180	391	-	-	(Cárdenas y León, 2013)
Materiales sólidos	Aceite mineral de arena y roca	0,15		1700	-	1,3	1	(Gil et al., 2010)
	Acero fundido	5,0		7800		0,6	40	(Gil et al., 2010)
	Hormigón	0,05		2200		0,85	1,5	(Gil et al., 2010)
Parafina	Cera parafina	1	64	916	173,6		0,346	(Farid et al., 2004)
	N-Pentadecano	0,59	10		-	-	206	(Pielichowska y Pielichowski, 2014)
	N-Hexadecano	4	20	773	-	-	236	(Pielichowska y Pielichowski, 2014)
Ácidos grasos	Ácido caprílico	5	16	981	148,5	-	0,149	(Farid et al., 2004; Hasnain, 1998)
	Ácido cáprico	4	32	1004	152,7	-	0,153	(Farid et al., 2004; Hasnain, 1998)
	Ácido laurico	1	42	870	171	-	-	(Hasnain, 1998; Pielichowska y Pielichowski, 2014)
	Ácido mirístico	1,89	54	860	190	-	-	(Hasnain, 1998; Pielichowska y Pielichowski, 2014)
	Ácido palmítico	1	64	989	185,4	-	0,162	(Farid et al., 2004; Hasnain, 1998)
Easters	Palmitato de metilo	100	27	-	163,2	-	-	(Pielichowska y Pielichowski, 2014)
	Estearato de metilo	10	39	-	160,7	-	-	(Pielichowska y Pielichowski, 2014)

Glicoles	Poli etilenglicol	2	4,2		117,6			(Hasnain, 1998)
	PEG600	2	12,5	-	129,1	-	-	(Pielichowska y Pielichowski, 2014)
	PEG1000	2	40	-	168,6	-	-	(Pielichowska y Pielichowski, 2014)

4. CONCLUSIONES

1. La mayoría de los estudios referentes a las tecnologías de almacenamiento térmico están representados por los Estados Unidos de América y China, ya que estas naciones muestran un importante volumen de investigaciones en esta temática en las revistas de mayor impacto a nivel mundial.
2. En las tecnologías de acumulación térmica las líneas de investigación que más resultados visualizan son: las investigaciones en energética, las investigaciones en ingeniería y los estudios en ciencia de materiales.
3. En el área de alta temperatura, los materiales inorgánicos como las sales de nitrato son los materiales de almacenamiento de energía térmica más utilizados, mientras que, en las áreas de media e inferior temperatura, los materiales orgánicos como la parafina comercial son los más utilizados.
4. El éxito de cualquier tecnología de almacenamiento de energía térmica tiene una fuerte dependencia del costo del material de acumulación térmica seleccionado, por ellos los proyectos dirigidos a la optimización de las características químicas y físicas de los materiales de almacenamiento térmico son una de las tendencias investigativas.

REFERENCIAS

- Ahmed, S.F., Khalid, M., Rashmi, W., Chan, A., y Shahbaz, K., Recent progress in solar thermal energy storage using nanomaterials., *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 67, 2017, pp. 450-460.
- Cárdenas, B., y León, N., High temperature latent heat thermal energy storage: Phase change materials, design considerations and performance enhancement techniques., *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 27, 2013, pp. 724-737.
- Chen, H., Cong, T.N., Yang, W., Tan, C., Li, Y., y Ding, Y., Progress in electrical energy storage system: A critical review., *Progress in Natural Science*, Vol. 19, No. 3, 2009, pp. 291-312.
- Farid, M.M., Khudhair, A.M., Razack, S.A.K., y Al-Hallaj, S., A review on phase change energy storage: materials and applications., *Energy Conversion and Management*, Vol. 45, No. 9, 2004, pp. 1597-1615.
- Gil, A., Medrano, M., Martorell, I., Lázaro, A., Dolado, P., Zalba, B., y Cabeza, L. F., State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1-Concepts, materials and modellization., *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, No. 1, 2010, pp. 31-55.
- Hasnain, S., Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: heat storage materials and techniques., *Energy Conversion and Management*, Vol. 39, No. 11, 1998, pp.1127-1138.
- Khalifa, A., Tan, L., Mahony, D., Date, A., y Akbarzadeh, A., Numerical analysis of latent heat thermal energy storage using miniature heat pipes: A potential thermal enhancement for CSP plant development., *Applied Thermal Engineering*, Vol. 10-8, No. 4, 2016, pp. 93-103.

- Köberle, A.C., Gernaat, D.E., y van Vuuren, D.P., Assessing current and future techno-economic potential of concentrated solar power and photovoltaic electricity generation., *Energy*, Vol. 89, 2015, pp. 739-756.
- Kuravi, S., Trahan, J., Goswami, D.Y., Rahman, M.M., & Stefanakos, E.K., Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants., *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 39, No. 4, 2013, pp. 285-319.
- Liu, M., Saman, W., y Bruno, F., Review on storage materials and thermal performance enhancement techniques for high temperature phase change thermal storage systems., *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, No. 4, 2012, pp. 2118-2132.
- Nkhonjera, L., Bello-Ochende, T., John, G., y King'onde, C.K., A review of thermal energy storage designs, heat storage materials and cooking performance of solar cookers with heat storage., *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 3-12, No. 2, 2016, pp. 204-221.
- Pielichowska, K., y Pielichowski, K., Phase change materials for thermal energy storage., *Progress in materials science*., Vol. 65, 2014, pp. 67-123.
- Rodríguez, J.M., Sánchez, D., Martínez, G.S., Bennouna, E.G., y Ikken, B., Techno-economic assessment of thermal energy storage solutions for a 1 MWe CSP-ORC power plant., *Solar Energy*, Vol. 140, 2016, pp. 206-218.
- Ruiz-Cabañas, F.J., Jové, A., Prieto, C., Madina, V., Fernández, A.I., & Cabeza, L.F., Materials selection of steam-phase change material (PCM) heat exchanger for thermal energy storage systems in direct steam generation facilities., *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 159, 2017, pp. 526-535.
- Shivashankar, S., Mekhilef, S., Mokhlis, H., & Karimi, M., Mitigating methods of power fluctuation of photovoltaic (PV) sources—A review., *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 59, 2016, pp. 1170-1184.
- Tay, N.H.S., Liu, M., Belusko, M., y Bruno, F., Review on transportable phase change material in thermal energy storage systems., *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 12-4, No. 4, 2016, pp. 313-326.
- Vijayakumar, G., Kummert, M., Klein, S.A., y Beckman, W.A., Analysis of short-term solar radiation data., *Solar Energy*, Vol. 79, No. 5, 2005, pp. 495-504.
- Xu, B., Li, P., y Chan, C., Application of phase change materials for thermal energy storage in concentrated solar thermal power plants: a review to recent developments., *Applied Energy*, Vol. 160, 2015, pp. 286-307.
- Zhou, N., Yu, Y., Yi, J., & Liu, R., A study on thermal calculation method for a plastic greenhouse with solar energy storage and heating., *Solar Energy*, Vol. 142, 2017, pp. 39-48.