

REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE DEL ALMACENAMIENTO TÉRMICO DE
ENERGÍA, DE TIPO LATENTE, POR MEDIO DE LA PRODUCCIÓN DE HIELO

HENRY ALEJANDRO OLAYA GARCÍA

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES

FACULTAD

PROGRAMA INGENIERÍA MECÁNICA

BOGOTÁ

2017

REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE DEL ALMACENAMIENTO TÉRMICO DE
ENERGÍA, DE TIPO LATENTE, POR MEDIO DE LA PRODUCCIÓN DE HIELO

HENRY ALEJANDRO OLAYA GARCÍA

Monografía para optar al título profesional en Ingeniería Mecánica

Asesor

VÍCTOR MANUAL CARRILLO ÁLVAREZ

Docente Académico

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES

FACULTAD

PROGRAMA INGENIERÍA MECÁNICA

BOGOTÁ

2017

TABLA DE CONTENIDO

1. RESUMEN	6
2. INTRODUCCIÓN	7
3. JUSTIFICACIÓN	9
4. OBJETIVOS	10
5. CONTEXTUALIZACIÓN SOBRE EL TEMA	11
6. MATERIALES Y MÉTODOS	17
7. RESULTADOS	19
6.1 Vigencia del tema.....	19
6.2 Posicionamiento del tema.....	25
6.3 Representación del ELR frente al conjunto de estudios más posicionados	29
6.4 Descripción de los documentos abordados.....	30
6.5 Características presentadas en los estudios.....	42
8. DISCUSIÓN	45
9. CONCLUSIONES	48
10. REFERENCIAS	49

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Selección de términos claves para el desarrollo de la investigación.	21
Tabla 2. Representación de los resultados de la búsqueda efectuada sin y con uso de área de búsqueda.	22
Tabla 3. Cantidad de documentos publicados hasta 2017 usando título, resumen y palabras clave.	23
Tabla 4. Cantidad de documentos publicados hasta 2017 y de 2013 a 2017 usando solo el título.	24
Tabla 5. Top 10 de documentos más citados hasta 2017 con solo el título.	27
Tabla 6. Top 10 de documentos más citados de 2013 a 2017 con solo el título.	29
Tabla 7. Análisis de representación del ELR frente a lo más posicionado.	30

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación del almacenamiento térmico de energía.	12
Figura 2. Esquema básico de un sistema de almacenamiento térmico usando hielo.	14
Figura 3. Mapa de delimitación del Espacio Literario Relevante (ELR).	18
Figura 4. Tendencia - documentos publicados hasta 2017 usando título, resumen y palabras clave.	23
Ilustración 5. Tendencia - documentos publicados hasta 2017 y de 2013 a 2017 usando solo el título	24

1. RESUMEN

La alta demanda que posee en la actualidad la energía eléctrica ha generado mayores problemas en relación al cambio climático, por lo que se hace necesario utilizar diferentes medios que permitan mitigar este fenómeno y adicionalmente reducir el impacto económico derivado del uso de este tipo de energía. El presente artículo busca explorar, de forma investigativa, una alternativa a la problemática mencionada a través del almacenamiento térmico de energía desde la producción de hielo. Para lo cual se realiza un estudio de vigencia del tema tanto a nivel histórico hasta 2017 como desde 2013 a 2017, con lo cual se pueda identificar lo que se ha hecho en torno a esta tecnología además de posibles oportunidades de investigación que favorezcan futuros trabajos académicos.

2. INTRODUCCIÓN

El almacenamiento térmico de energía, sobre todo mediante el uso y producción de hielo es importante para la comunidad académica y cualquier otro ente investigativo, ya que es una tecnología que con el pasar de los años ha presentado grandes avances y buenos resultados en diferentes lugares como oficinas, escuelas, hospitales, centros comerciales y en aplicaciones principalmente relacionadas con la climatización y el aire acondicionado, debido a que es una buena alternativa para reducir el consumo de energía eléctrica favoreciendo aspectos tanto económicos como ambientales en donde empresas como BAC¹ o IceEnergy² han venido siendo exponentes de estos avances.

El presente artículo, siguiendo la metodología de revisión sistemática propuesta por Pérez³, tiene como objetivo responder a la siguiente pregunta de investigación: ¿cuáles son las condiciones actuales y los desafíos investigativos del almacenamiento térmico de energía, por medio de la fabricación de hielo?

Para abordar este problema, dicha pregunta fue dividida o sistematizada en cuatro fases que son: identificar, describir, profundizar y divulgar en las cuales se desarrollan una serie de procesos fundamentados en conocer la vigencia del tema a investigar, las publicaciones y posicionamiento tanto a nivel histórico como en un periodo de tiempo de cinco años, el contenido de las publicaciones más

¹ Emerson Swan. BAC Ice Thermal Storage. Disponible en <http://www.emersonswan.com/manufacturers-products/bac-ice-thermal-storage.html>. Citado el 20 de febrero de 2018

² Ice Energy. A smart Ice Bear battery. Disponible en <https://www.ice-energy.com/technology/>. Citado el 20 de febrero de 2018

³ PÉREZ, Jorge. Revisión sistemática de literatura en ingeniería. Colombia: Editorial Universidad de Antioquia. 2012

posicionadas en la comunidad académica identificando las características comunes entre los diferentes documentos y finalizando con la exposición de oportunidades de investigación alrededor de esta temática.

Para lo cual se parte de la contextualización acerca del tema, se exponen los materiales y métodos, posteriormente se plasman los resultados obtenidos para las diferentes fases, se discuten los mismos mediante la comparación de estudios y finalmente se concluye.

Todos estos elementos fueron abordados a través de una búsqueda planeada, estructurada y soportada haciendo uso de la base de datos ScienceDirect, a través de la cual se puede identificar que el espacio literario abordado en el artículo para el tema a tratar representa un 19,2% del total de documentos, bajo los criterios de búsqueda, y reúne el 74,3% de las citas que la comunidad académica le ha otorgado a lo largo del tiempo.

3. JUSTIFICACIÓN

El presente proyecto de investigación surge en parte debido a la problemática de la alta demanda que posee en la actualidad la energía eléctrica, la cual al obtenerse de fuentes convencionales como el gas, petróleo o carbón, favorece el cambio climático y la contaminación de los ecosistemas y de la atmósfera.

Por lo cual, el uso de métodos que permitan almacenar energía para ser utilizada cuando se requiera permitiría reducir la diferencia entre las curvas de demanda y oferta energética, ya que la energía almacenada previamente en las horas de la noche, en donde la demanda no es tan elevada como durante el día, ofrecería una buena alternativa que supliría las necesidades energéticas diurnas en especial en momentos de alta demanda, con lo que haría posible que edificaciones, principalmente de oficinas, colegios y universidades pudieran beneficiarse gracias a la reducción de costos por consumo energético y favorecer con ello al ambiente.

Por otro lado, esta investigación permitirá observar la vigencia, el posicionamiento, la evolución y las oportunidades de investigación del almacenamiento térmico de energía a través de la producción de hielo, lo que beneficiará al grupo GIDAD de la Fundación Universitaria Los Libertadores, ya que los resultados darán pautas para proyectos de investigación que se planteen a futuro, pertenecientes a la sublínea de investigación “Diseño de sistemas de ingeniería basados en fenómenos de transporte”.

4. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Determinar, mediante una investigación documental, el estado del arte del almacenamiento térmico de energía por medio de la elaboración de hielo.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar, mediante una investigación documental, la vigencia del estudio sobre el almacenamiento térmico de energía por medio de la elaboración de hielo.
- Determinar, mediante una investigación documental, el espacio literario relevante sobre el almacenamiento térmico de energía por medio de la elaboración de hielo.
- Describir, mediante una investigación documental, la variación de las tendencias del estudio sobre el almacenamiento térmico de energía por medio de la elaboración de hielo.
- Identificar las oportunidades de investigación alrededor el almacenamiento térmico de energía por medio de la elaboración de hielo.
- Socializar los resultados por medio de la escritura y la postulación de un artículo de revisión.

5. CONTEXTUALIZACIÓN SOBRE EL TEMA

El hielo ha sido desde hace tiempo utilizando para climatizar, ya que desde la época de Platón, como lo menciona Nordell⁴, se recolectaba en las montañas en invierno, almacenándose en edificios aislados térmicamente para ser luego usado en el verano. Ya en el siglo XIX se comercializaba hielo almacenado desde Estados Unidos y Europa y aunque con la llegada del refrigerador moderno en los 50s empezó a verse reemplazado, recientemente ha vuelto a adquirir interés por debido al aumento del costo energético a nivel mundial.

Esta tendencia propicio el desarrollo de una tecnología denominada almacenamiento térmico de energía mediante la producción de hielo o también llamada Ice Thermal Storage o Ice Thermal Energy Storage, la cual se deriva del almacenamiento térmico y a su vez del almacenamiento de calor de tipo latente (Latent Heat Storage) siendo clasificado en dos tipos: sólido y líquido⁵ como se puede apreciar en la figura.

⁴ NORDELL, Bo. Using ice and snow in thermal energy storage systems. *Advances in Thermal Energy Storage Systems*, 2015

⁵ Global Environment Centre Foundation. Thermal Storage Technology. Disponible en http://nett21.gec.jp/ESB_DATA/EN/Tech/html/esb-123.html. Citado el 20 de febrero de 2018

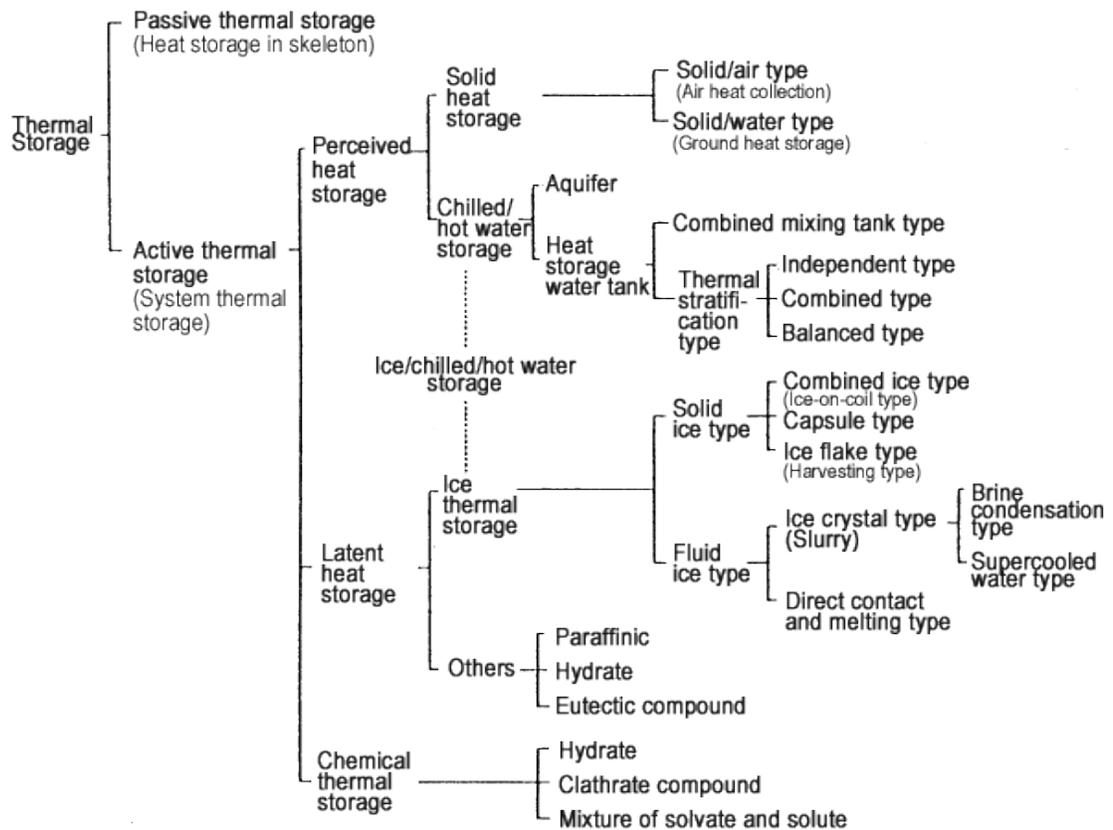


Figura 1. Clasificación del almacenamiento térmico de energía⁶.

Este tipo de almacenamiento es uno de los más rentables para ser usado principalmente como sistema auxiliar en instalaciones de aire acondicionado en oficinas, escuelas, hoteles, hospitales, como lo mencionan Wu y Tsai⁷ en un proyecto enfocado en la implementación de este sistema en un hospital, ya que como tecnología bastante reconocida reduce considerablemente la alta demanda energética, almacenando energía en horas de baja demanda⁸ (noche) favoreciendo el costo de equipos, de operación y energéticos, además de ser

⁶ Ibid.

⁷ WU, Chung-Tai & TSAI, Yao-Hsu. Design of an ice thermal energy storage system for a building of hospitality operation. International Journal of Hospitality Management, 2015

⁸ ARTECONI, A, HEWITT, N.J & POLONARA, F. State of the art of thermal storage for demand-side management. Applied Energy, 2012

adaptable a estructuras y requerimientos diversos, reduciendo a su vez la necesidad de nuevas plantas de generación⁹ lo que beneficia la reducción del impacto ambiental producto del uso intensivo de sistemas convencionales de aire acondicionado¹⁰, junto a una reducción del mantenimiento que pueda requerir debido a que presenta pocas partes móviles y elementos como bombas, enfriadores e intercambiadores de calor son más pequeños que los usados en un sistema tradicional de aire acondicionado¹¹ siendo bastante factible su uso en zonas tropicales como lo destaca un estudio realizado por Yau & Lee¹².

El funcionamiento básico de este sistema es similar al proceso de hacer hielo antes de una fiesta, en el cual se usa un recipiente para contener el agua que va a congelarse y un refrigerador para ejecutar el proceso de enfriamiento del agua. Este sistema se compone principalmente de un refrigerador, unidad enfriador o batería de hielo, un tanque de almacenamiento de agua, un sistema de ventiladores y un intercambiador de calor¹³ como se puede apreciar en la figura.

⁹ HENDERSON, Greg. Ice Thermal Storage System. Disponible en http://www.ashraebistate.org/sites/default/files/events/ice_storage_systems.pdf . Citado el 20 de febrero de 2018

¹⁰ ELTON, Jeremy. Cool Idea: Using Ice to Chill Buildings in NYC. Disponible en <https://www.treehugger.com/clean-technology/cool-idea-using-ice-to-chill-buildings-in-nyc.html>. Citado el 20 de febrero de 2018

¹¹ The NEWS. The Benefits of Ice Thermal Storage. Disponible en <https://www.achrnews.com/articles/100644-the-benefits-of-ice-thermal-storage>. Citado el 20 de febrero de 2018

¹² YAU, Y.H & LEE, S.K. Feasibility study of an ice slurry-cooling coil for HVAC and R systems in a tropical building. Applied Energy, 2010

¹³ CALMAN. IceBank Benefits. How Thermal Energy Storage Works. Disponible en <http://www.calmac.com/how-energy-storage-works>. Citado el 20 de febrero de 2018

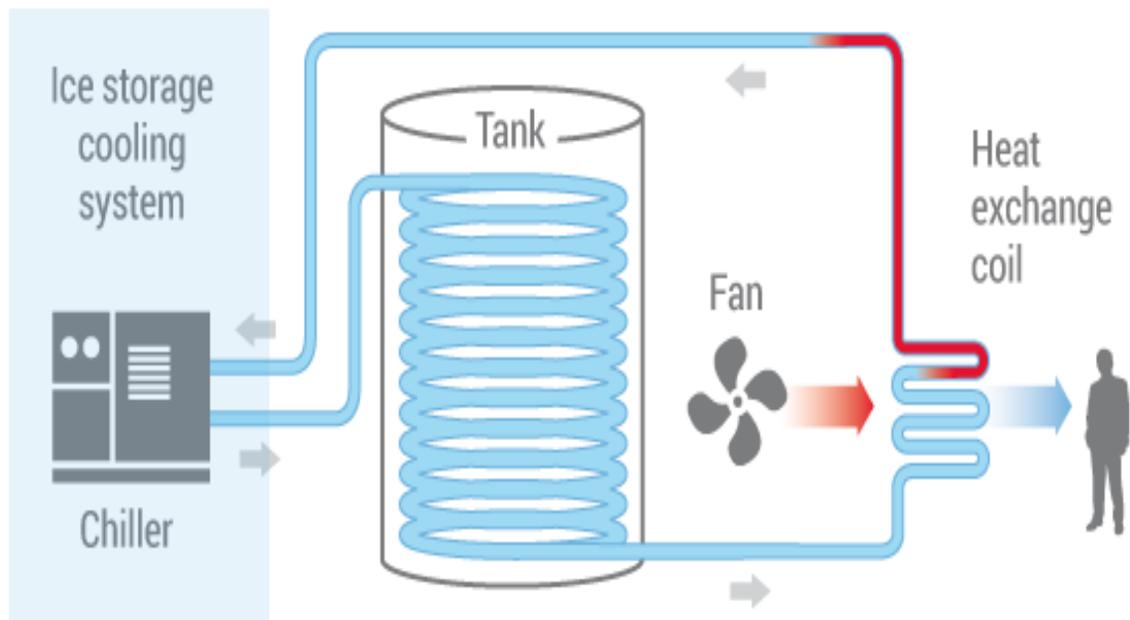


Figura 2. Esquema básico de un sistema de almacenamiento térmico usando hielo¹⁴.

Su funcionamiento se base en cuatro etapas distribuidas en dos periodos – carga y descarga:

- En la noche, horas de baja demanda energética (noche), una solución de agua con etilenglicol se enfría en el enfriador – chiller que se compone de dos secciones: una en donde se encuentra un condensador, bomba, compresor y otra donde está el intercambiador de calor compuesto por serpentines dentro de un tanque de almacenamiento de agua, en donde ambas secciones comúnmente se encuentran integradas en una sola unidad denominada batería de hielo que funciona durante esta fase con energía eléctrica.

¹⁴ Ibid

- La solución circula por los serpentines del intercambiador de calor contenido en el tanque lleno de agua lo que produce una transferencia de calor congelando el agua contenida en el tanque.
- En el día, cuando la demanda aumenta, junto con temperatura del recinto a enfriar, la solución pasa de la unidad de aire acondicionado al tanque donde está almacenado el hielo, lo que produce un intercambio de calor que derrite el hielo y transfiere la energía a la solución que es impulsada por la bomba al sistema convencional de aire acondicionado que se encuentra apagado en ese momento.
- Con la ayuda de un evaporador, funcionando como un segundo intercambiador de calor instalado en el sistema convencional, se transfiere la energía al recinto sacando por un lado calor de este con ayuda de un sistema de ventiladores y generando como consecuencia que la temperatura del recinto baje.

En la actualidad, la mayoría de estos sistemas se enfocan por un lado en los de tipo ice-on-coil y en los ice slurry, siendo estos últimos una excelente opción por la mejora del uso eficiente de la energía que ofrecen¹⁵ junto al creciente interés por el uso de fuentes de energía renovables como la solar y el almacenamiento térmico de energía combinando la generación y el almacenamiento¹⁶, que con el avance de los denominados materiales con cambio de fase (PCM – Phase

¹⁵ WANG, M.J & KUSUMOTO, N. Ice slurry based thermal storage in multifunctional buildings. Heat and Mass Transfer, 2001

¹⁶ CHIDAMBARAM. L.A, et al. Review of solar cooling methods and thermal storage options. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2011

Change Materials), que mantienen constante la temperatura durante el cambio de fase mientras el material almacenado cede energía¹⁷, han permitido que aplicaciones ligadas a bajas temperaturas como el almacenamiento de alimentos y su transporte mediante vehículos que incorporan sistemas de refrigeración sean cada vez mayores¹⁸.

¹⁷ OLIVER. A, NEILA, F.J & GARCÍA – SANTOS, A. Clasificación y selección de materiales de cambio de fase según sus características para su aplicación en sistemas de almacenamiento de energía térmica. *Materiales de Construcción*, 2012

¹⁸ ORO. E, et al. Review on phase change materials (PCMs) for cold thermal energy storage applications. *Applied Energy*, 2012

6. MATERIALES Y MÉTODOS

Como se mencionó anteriormente se sigue la metodología propuesta en el libro “Revisión sistemática de literatura en ingeniería” de Jorge Iván Pérez, tomando cuatro fases organizadas de la siguiente manera:

- Fase I - Identificación: en esta fase se selecciona el tema específico revisando el estado del arte, formulando y sistematizando la pregunta general de investigación, seleccionando los términos de búsqueda con los que se construye el mapa de delimitación del espacio literario relevante, para analizar la vigencia del tema, identificando los estudios más relevantes escritos en la historia y un periodo de tiempo, buscando la representatividad de los documentos del espacio literario relevante.
- Fase II - Descripción: en esta fase se describe el espacio literario relevante identificado y localizado, mediante la elaboración de un estudio de campo, cada una de las publicaciones más posicionadas sobre el tema a investigar, diciendo de qué tratan y qué aportan al tema.
- Fase III - Profundización: en esta fase se profundiza en las características globales del espacio literario relevante (ELR), identificando, analizando e interpretando la ocurrencia de sucesos, tendencias, vacíos de conocimiento y perspectivas de cambio a través del tiempo y los últimos cinco años.
- Fase IV - Divulgación: en esta fase se definirá el formato y estructura, se elaborará y ajustará el manuscrito enviándolo por último a la fuente para publicación.

Por lo tanto, siguiendo la metodología planteada, y el tema de investigación identificado junto con la pregunta de investigación sistematizada, se procede con la delimitación del espacio de búsqueda o también llamado el espacio literario relevante (ELR) mediante un mapa mental como se muestra en la figura 3.

El objetivo principal de su realización radica en con este se logra, como sucede con el protocolo de revisión en los campos de salud, integrar lo relacionado con la formulación y sistematización de la pregunta general de investigación con lo referente a la selección de los términos de búsqueda junto al resto de elementos de la planeación dentro del trabajo investigativo.

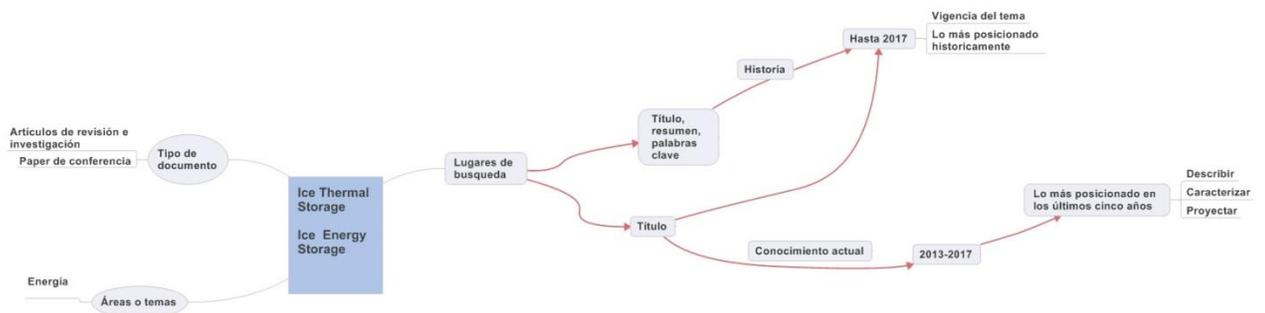


Figura 3. Mapa de delimitación del Espacio Literario Relevante (ELR).

En esta figura, se aprecian términos de búsqueda colocados en la parte central, remitiéndose a artículos de revisión e investigación junto a paper de conferencia, tomando el concepto de energía como el área, además de realizar la búsqueda con la triada título, resumen y palabras clave hasta el años 2017 y el solo del título tanto hasta 2017 como en un periodo de cinco años (2013-2017).

7. RESULTADOS

6.1 Vigencia del tema

Los términos de búsqueda en el mapa de delimitación se han ido obteniendo siguiendo una serie de pasos:

En primera instancia se generan términos de búsqueda a partir de la familiarización que los autores del proyecto adquirieron en la etapa de anteproyecto ya desarrollada.

Posteriormente, tomando estos conceptos como base, se procede a realizar una búsqueda de documentos en buscadores convencionales como GOOGLE y WIKIPEDIA mirando los títulos, las palabras claves y las referencias de estos en donde se pudieron adicionar otros términos.

Finalmente, con estas dos secciones abordadas se realiza la búsqueda en las bases de datos ENGINEERING SOURCE, APPLIED SCIENCE AND TECHNOLOGY SOURCE y SCIENCE DIRECT tomando como referencia los términos de mayor relevancia consignados en estas bases.

Todo esto, da forma al conjunto total de términos de búsqueda propuesto en la siguiente tabla, en donde finalmente se toman solo dos términos considerados como los de mayor relevancia dentro del tema central de investigación, los cuales servirán como insumo de consulta para la siguiente etapa de la metodología.

Términos	Resultado
Thermal Energy Storage	No adecuado
Latent Thermal Energy Storage	No adecuado
Latent Thermal Storage	No adecuado
Latent Heat Thermal Energy Storage	No adecuado
Thermal Ice Making	No adecuado
Cold Storage	Adecuado, pero no suficiente
Cool Storage	Adecuado, pero no suficiente
Latent Thermal Energy Storage by Ice Making	Adecuado, pero no suficiente
Cool Thermal Energy Storage	Adecuado, pero no suficiente
Cold Thermal Energy Storage	Adecuado, pero no suficiente
Ice Thermal Energy Storage	Adecuado, pero no suficiente
Ice Making Storage	Adecuado, pero no suficiente
Ice Latent Thermal Energy Storage	Adecuado, pero no suficiente
Ice And Snow In Thermal Storage Systems	Adecuado, pero no suficiente
Ice Storage	Adecuado, pero no suficiente

Ice Thermal Storage	Adecuado
Ice Energy Storage	Adecuado

Tabla 1. Selección de términos claves para el desarrollo de la investigación.

Como se puede apreciar se seleccionaron los términos de búsqueda Ice Thermal Storage y Ice Storage debido, principalmente a su relevancia dentro del tema de investigación y también a los criterios de búsqueda de la base de datos ScienceDirect, que fue utilizada como principal fuente de información dentro de toda la consulta.

Esta base de datos, se caracteriza por facilitar la búsqueda avanzada que limita los criterios de búsqueda por condición y por periodo de tiempo para la generación de los algoritmos de búsqueda que contienen conceptos más relevantes y ligados al tema central del presente documento.

Adicionalmente, se agrega el área de mayor relevancia dentro de la investigación ofrecida en esta base de datos (Energía), aunque en primera instancia se realiza una revisión sin límite de área para comparar los resultados, permitiendo de esta manera filtrar los artículos y consiguiendo con ello una mayor precisión en la información obtenida considerando la triada título, resumen, palabras clave como solo el título obteniendo como resultado la cantidad de documentos aplicando cada condición de búsqueda ya mencionada.

Estos algoritmos fueron:

- TITLE-ABSTR-KEY(Ice Thermal Storage) or TITLE-ABSTR-KEY(Ice Energy Storage)[All Sources(Energy)].
- TITLE(Ice Thermal Storage) or TITLE(Ice Energy Storage)[All Sources(Energy)].

Con los cuales se obtienen los resultados mostrados en las siguientes tablas:

Términos de búsqueda	(DETERMINACIÓN DE LA VIGENCIA) Título, resumen, palabras claves hasta 2017		(DETERMINACIÓN DEL POSICIONAMIENTO) Título hasta 2017		(DETERMINACIÓN DEL POSICIONAMIENTO EN LOS ÚLTIMOS CINCO AÑOS) Título de 2013 a 2017	
	Sin área	Con área	Sin área	Con área	Sin área	Con área
Ice Thermal Storage – Ice Storage	579	280	69	52	28	20

Tabla 2. Representación de los resultados de la búsqueda efectuada sin y con uso de área de búsqueda.

Año	Número de publicaciones
2017	36
2016	26
2015	22
2014	21
2013	26
2012	28
2011	6
2010	11
2009	10
2008	3
2007	8
2006	7
2005	3
2004	3
2003	8
2002	6
2001	7
2000	3
1999	5
1998	2
1996 and earlier	39

Tabla 3. Cantidad de documentos publicados hasta 2017 usando título, resumen y palabras clave.



Figura 4. Tendencia - documentos publicados hasta 2017 usando título, resumen y palabras clave.

Año	Número de publicaciones
2017	8
2016	5
2015	2
2014	2
2013	3
2012	7
2011	3

2009	1
2007	1
2006	2
2003	5
2002	1
2001	1
1999	1
1996	5
1995	4
1988	1

Tabla 4. Cantidad de documentos publicados hasta 2017 y de 2013 a 2017 usando solo el título.



Ilustración 5. Tendencia - documentos publicados hasta 2017 y de 2013 a 2017 usando solo el título

6.2 Posicionamiento del tema

En esta parte de la metodología se efectúa la selección del TOP 10 de documentos con mayor cantidad de citas por parte de la comunidad académica históricamente y de 2013 a 2017 producto del paso anterior considerando solo el título lo cual da como resultado las siguientes tablas, destacando que algunas posiciones repiten el número debido a que la cantidad de citas entre estos documentos es la misma.

Posición	Título	Autor (es)	Año	Revista	Tipo	Citas
1	Freezing and melting of water in spherical enclosures of the type used in thermal (ice) storage systems	Ian W. Eames, Kamel T. Adref	2002	Applied Thermal Engineering	Original Research Article	79
2	Guidelines for improved performance of ice storage systems	Gregor P. Henze, Moncef Krarti, Michael J. Brandemuehl	2003	Energy and Buildings	Original Research Article	55
3	Optimization of an ice-storage air conditioning system using dynamic programming method	Huei-Jiunn Chen, David W.P. Wang, Sih-Li Chen	2005	Applied Thermal Engineering	Original Research Article	50
4	Thermal-economic-environmental analysis and multi-objective optimization of an ice thermal energy storage system for gas turbine cycle inlet air cooling	Ali Shirazi, Behzad Najafi, Mehdi Aminyavari, Fabio Rinaldi, Robert A. Taylor	2014	Energy	Original Research Article	34
5	Thermo-economic optimization of	Sepehr Sanaye, Ali	2013	Energy and Buildings	Original Research	31

	an ice thermal energy storage system for air-conditioning applications	Shirazi			Article	
5	Analysis of ice cool thermal storage for a clinic building in Kuwait	M.J. Sebzali, P.A. Rubini	2006	Energy Conversion and Management	Original Research Article	31
5	An ice thermal storage computer model	Chatchawan Chaichana, William W.S Charters, Lu Aye	2001	Applied Thermal Engineering	Original Research Article	31
6	Numerical heat transfer analysis of encapsulated ice thermal energy storage system with variable heat transfer coefficient in downstream	Aytunc Erek, Ibrahim Dincer	2009	International Journal of Heat and Mass Transfer	Original Research Article	28
6	Thermoeconomic optimization of an ice thermal storage system for gas turbine inlet cooling	Sepehr Sanaye, Abbasali Fardad, Masoud Mostakhdemi	2011	Energy	Original Research Article	28
7	Energy and exergy analyses of an ice-on-coil thermal energy storage system	Mehmet Akif Ezan, Aytunç Erek, Ibrahim Dincer	2011	Energy	Original Research Article	27
8	Modeling of an ice-on-coil thermal energy storage system	Alex H.W. Lee, Jerold W. Jones	1996	Energy Conversion and Management	Original Research Article	25
9	Optimal control of building storage systems using both ice storage and thermal mass – Part I: Simulation environment	Ali Hajiah, Moncef Krarti	2012	Energy Conversion and Management	Original Research Article	24
9	Heat transfer prediction for a direct contact ice thermal energy storage	T Kiatsiroat, S Vithayasai, N Vorayos, A Nuntaphan, N Vorayos	2003	Energy Conversion and Management	Original Research Article	24
10	Numerical simulation of	Babak K	2003	Energy	Original	22

	water solidification phenomenon for ice-on-coil thermal energy storage application	Soltan, Morteza M Ardehali		Conversion and Management	Research Article	
10	Impacts of ice storage on electrical energy consumptions in office buildings	Fakeha Sehar, Saifur Rahman, Manisa Pipattanasorn	2012	Energy and Buildings	Original Research Article	22

Tabla 5. Top 10 de documentos más citados hasta 2017 con solo el título.

Posición	Título	Autor (es)	Año	Revista	Tipo	Citas
1	Thermal-economic-environmental analysis and multi-objective optimization of an ice thermal energy storage system for gas turbine cycle inlet air cooling	Ali Shirazi, Behzad Najafi, Mehdi Aminyavari, Fabio Rinaldi, Robert A. Taylor	2014	Energy	Original Research Article	34
2	Thermo-economic optimization of an ice thermal energy storage system for air-conditioning applications	Sepehr Sanaye, Ali Shirazi	2013	Energy and Buildings	Original Research Article	31
3	A comparative study on PCM and ice thermal energy storage tank for air-conditioning systems in office buildings	Mohammad Hoseini Rahdar, Abolghasem Emamzadeh, Abtin Ataei	2016	Applied Thermal Engineering	Original Research Article	13
4	Optimization and analysis of Building Combined Cooling, Heating and Power (BCHP) plants with chilled ice thermal storage system	Yingjun Ruan, Qingrong Liu, Zhengwei Li, Jiazheng Wu	2016	Applied Energy	Original Research Article	11
4	An experimental investigation into the integration of a jet-pump refrigeration cycle and a novel jet-spary thermal ice storage system	Ian W. Eames, Mark Worall, Shenyi Wu	2013	Applied Thermal Engineering	Original Research Article	11

5	Electricity cost saving comparison due to tariff change and ice thermal storage (ITS) usage based on a hybrid centrifugal-ITS system for buildings: A university district cooling perspective	Mohammad Omar Abdullah, Lim Pai Yii, Ervina Junaidi, Ghazali Tambi, Mohd Asrul Mustapha	2013	Energy and Buildings	Original Research Article	8
6	Impacts on the solidification of water on plate surface for cold energy storage using ice slurry	Shengchun Liu, Hailong Li, Mengjie Song, Baomin Dai, Zhili Sun	2017	Applied Energy	Original Research Article	5
6	Numerical study of thin layer ring on improving the ice formation of building thermal storage system	Junling Xie, Chris Yuan	2014	Applied Thermal Engineering	Original Research Article	5
7	Evaluation of ice thermal energy storage (ITES) for commercial buildings in cities in Brazil	Bruno Arcuri, Catalina Spataru, Mark Barrett	2017	Sustainable Cities and Society	Original Research Article	4
7	Parametric study of ice thermal storage system with thin layer ring by Taguchi method	Junling Xie, Chris Yuan	2016	Applied Thermal Engineering	Original Research Article	4
8	Performance of a swimming pool heating system by utilizing waste energy rejected from an ice rink with an energy storage tank	Muhammed Enes Kuyumcu, Hakan Tutumlu, Recep Yumrutaş	2016	Energy Conversion and Management	Original Research Article	3
9	Modeling and optimization of R-717 and R-134a ice thermal energy storage air conditioning systems using NSGA-II and MOPSO algorithms	Mohammad Hoseini Rahdar, Mohammad Heidari, Abtin Ataei, Jun-Ki Choi	2016	Applied Thermal Engineering	Original Research Article	2
9	Data analytics and optimization of an ice-based energy storage system for commercial buildings	Na Luo, Tianzhen Hong, Hui Li, Ruoxi Jia, Wenguo Weng	2017	Applied Energy	Original Research Article	2
9	Experimental and numerical study of thin	Hamid Jannesari, Naeim Abdollahi	2017	Applied Energy	Original Research	2

	ring and annular fin effects on improving the ice formation in ice-on-coil thermal storage systems				h Article	
9	Discharging performance of a forced-circulation ice thermal storage system for a permanent refuge chamber in an underground mine	Shu Wang, Longzhe Jin, Zhonglong Han, Yage Li, Shengnan Ou, Na Gao, Zhiling Huang	2017	Applied Thermal Engineering	Original Research Article	2
10	Identification of Design Criteria for District Cooling Distribution Network with Ice Thermal Energy Storage System	Gerardo L. Augusto, Alvin B. Culaba, Archie B. Maglaya	2015	Energy Procedia	Original Research Article	1

Tabla 6. Top 10 de documentos más citados de 2013 a 2017 con solo el título.

6.3 Representación del ELR frente al conjunto de estudios más posicionados

Para este paso se considera desde un análisis porcentual los documentos y las citas abordados en el TOP 10 ejecutado en el paso anterior tomando igualmente los dos periodos de tiempo (hasta 2017 y 2013 – 2017) y solo el título viéndose reflejado en la tabla 7, que permite destacar la relevancia e importancia de los documentos consultados mediante la investigación realizada y los resultados obtenidos que pueden ser de utilidad para futuras investigaciones.

Espacio literario	Población de documentos	Documentos en los top	Pdat (%)	Población de citas	Citas en los top	Pcat (%)
Entre 2013-	20	10 (d)	$(10/20)*100$	138	112	$(112/138)^*$

2017 (Título)			50			100 81,2
En la historia (1988-2017) (Título)	52	10	19,2	505	375	74,3
Total documentos (1988-2017)	52 (a)	20	38,5	505 (b)	487 (c)	96,4

(a) Incluye los 20 documentos de 2013-2017

(b) Contiene las 138 citaciones de 2013-2017

(c) Es la suma de las citaciones de cada top, ya que se excluyen mutuamente

(d) Se incluyen un par de documentos que coinciden con los obtenidos en el estudio histórico.

Tabla 7. Análisis de representación del ELR frente a lo más posicionado.

6.4 Descripción de los documentos abordados

En esta parte de la metodología se busca abordar cada artículo tomado del paso anterior, destacando aspectos ligados con lo que presenta cada uno en términos de contenido y resultados que puedan servir como enseñanza o fundamento para futuros trabajos relacionados. Esto se evidencia a continuación:

Eames y Adref ¹⁹ describen y evalúan los resultados de un experimento en el cual se estudia el comportamiento del agua contenida en una esfera al congelarse y derretirse, la cual es usada en sistemas de almacenamiento térmico de energía por hielo en aplicaciones de aire acondicionado llegando a concluir principalmente

¹⁹ EAMES, Ian & ADREF, Kamel. Freezing and melting of water in spherical enclosures of the type used in thermal (ice) storage systems. Applied Thermal Engineering, 2002

que 90% del frío puede extraerse en 70% del tiempo en el que dura todo el proceso de derretimiento.

Algo similar lo abordan Erek e Dincer²⁰ que realizan una nueva correlación del coeficiente de transferencia de calor alrededor de una esfera, usada en un sistema de almacenamiento térmico de energía para climatización de tipo encapsulado, mediante la comparación de las experimentaciones realizadas en el tanque cilíndrico de almacenamiento donde se depositan las esferas, destacando que este coeficiente de transferencia es crucial y que incrementa al hacerlo el número de Reynolds, además de tener presente que el proceso de solidificación se ve influenciado por el número de Stefan, el diámetro de la capsula y el lugar en el que se encuentre la esfera dentro del tanque.

Por otro lado, Henze, Krarti y Brandemuehl²¹, basados en una simulación dinámica programada, describen los resultados de la combinación de una planta de refrigeración con almacenamiento térmico de hielo, en la cual mediante una óptima estrategia de control se minimiza el costo operativo tomando en consideración parámetros como los sistemas de almacenamiento de hielo, los tipos de enfriadores y los costos de consumo de energía eléctrica. Esto se realiza en dos escenarios posibles tomados como ejemplo (edificaciones grandes para oficinas y en un supermercado) en donde se llega a plantear que una buena tarifa energética y una buena eficiencia en lo relacionado con la producción de hielo son

²⁰ EREK, Aytunc & DINCER, Ibrahim. Numerical heat transfer analysis of encapsulated ice thermal energy storage system with variable heat transfer coefficient in downstream. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009

²¹ HENZE. Gregor, KRARTI. Moncef & BRANDEMUE, Michael. Guidelines for improved performance of ice storage systems. Energy and Buildings, 2003

factores fundamentales para implementar un sistema como el mencionado en la vida real.

Sehar, Rahman y Pipattanasomporn²² analizan a su vez el consumo energético de un enfriador para un sistema convencional sin almacenamiento de energía y con almacenamiento de hielo para edificios de oficinas de grande y mediano tamaño en diversas zonas climáticas con la ayuda de una herramienta llamada Demand Response Quick Assessment Tool (DRQAT) para modelar y simular estos escenarios, obteniendo como resultado que el consumo energético depende bastante de las condiciones climáticas, ya que zonas con altas temperaturas y humedades relativas igualmente altas incrementan notoriamente el consumo energético del enfriado frente a aquellas zonas con menores condiciones, sobre todo en épocas de verano.

Por otra parte, Chen, Wang y Chen²³ desarrollan un documento en donde buscan optimizar un sistema de almacenamiento térmico de hielo para aire acondicionado usando la técnica del algoritmo de programación dinámica considerando elementos como el costo de vida útil y la eficiencia del tanque de almacenamiento de hielo junto con la capacidad óptima del enfriador, lo que permite llegar a afirmar que usar hielo para almacenar energía permite un costo de vida útil menor y una recuperación de la inversión mucho más rápida que si se utiliza un sistema convencional.

²² SEHAR. Fakeha, RAHMAN. Saifur & PIPATTANASOMPORN, Manisa. Impacts of ice storage on electrical energy consumptions in office buildings. *Energy and Buildings*, 2012

²³ CHEN. Huei-Jiunn, WANG. David & CHEN, Sih-Le. Optimization of an ice-storage air conditioning system using dynamic programming method. *Applied Thermal Engineering*, 2005

Shirazi et al²⁴, utilizan un algoritmo genético multi-objetivo para diseñar los parámetros de optimización de un ITES (Ice Thermal Energy Storage) usado en la entrada de aire frío de un sistema de turbina de gas en una planta generadora en la que se logra un incremento de la potencia de salida de 11,63% y una eficiencia exergética de 3,59% con un periodo de recuperación de la inversión de 4,72 años. Sanaye, Fardad y Mostakhdemi²⁵ realizan a su vez otro análisis termoeconómico de un sistema de almacenamiento térmico de energía para ser usado en la misma aplicación, pero haciendo uso de una técnica de optimización, para obtener los parámetros de diseño óptimos, denominada algoritmo genético que permite incrementar la potencia de salida entre 3,9 a 25,7% aumentando la eficiencia en un rango de entre 2,1 y 5,2% con un periodo de recuperación de la inversión de entre 4 a 7,7 años.

Junto a estas dos investigaciones, Sanaye y Shirazi²⁶ realizan una investigación similar en donde utilizando esta misma técnica para ejecutar un análisis termo – económico de un sistema de almacenamiento térmico de energía con fabricación de hielo para ser usado en aplicaciones de aire acondicionado, que permita obtener factores como el costo de inversión, operativo y el relacionado con las emisiones de CO₂ que bajo los parámetros termodinámicos deben ser altos si se quiere obtener una buena eficiencia destacando además que se logra obtener una

²⁴ SHIRAZI, Ali, et al. Thermal–economic–environmental analysis and multi-objective optimization of an ice thermal energy storage system for gas turbine cycle inlet air cooling. Energy, 2014

²⁵ SANAYE, Sepehr, FARDAD, Abbasali & MOSTAKHDEMI, Masoud. Thermo-economic optimization of an ice thermal storage system for gas turbine inlet cooling. Energy, 2011

²⁶ SANAYE, Sepehr & SHIRAZI, Ali. Thermo-economic optimization of an ice thermal energy storage system for air-conditioning applications. Energy and Buildings, 2013

reducción del consumo eléctrico y emisiones de CO₂ anuales del orden del 9% y 9,8% respectivamente.

Por otra parte, Sebzali y Rubini²⁷ desarrollan una investigación en la cual se plantea estudiar los efectos del uso de un almacenador térmico de hielo en un sistema de aire acondicionado para ser usado en la reducción del consumo energético en horas de alta demanda en una clínica ubicada en Kuwait, mediante estrategias de almacenamiento parcial y total, concluyendo que la estrategia de almacenamiento total presenta la mayor reducción de consumo, aunque se requiere de un tanque de almacenamiento y un enfriador de mayor tamaño, además de un proceso de carga realizado de 6:00p.m a 8:00p.m o 9:00p.m para aprovechar de mejor manera la carga de refrigeración que ofrece el sistema.

Chaichana, Charters y Aye²⁸ también realizan un estudio, pero desde la perspectiva de un modelo dinámico computacional, en la ciudad de Bangkok para comparar el uso energético de un sistema de aire acondicionado convencional con un sistema de almacenamiento térmico de hielo usado en un planta de refrigeración en un edificio de esta ciudad, obteniendo principalmente una reducción en la tarifa energética del 55% mensual junto a una reducción del consumo total de energía de 5% frente al sistema de aire acondicionado convencional.

²⁷ SEBZALI , M.J & RUBINI, P.A. Analysis of ice cool thermal storage for a clinic building in Kuwait. Energy Conversion and Management, 2006

²⁸ CHAICHANA. Chatchawa, CHARTERS. William & AYE, Lu. An ice thermal storage computer model. Applied Thermal Engineering, 2001

Ezan, Ereğ e Dincer²⁹ realizan un estudio en el cual analizan desde la técnica de circuito de resistencia térmica de manera energética y exergética el periodo de carga de un sistema de almacenamiento de energía térmica por hielo de tipo ice-on-coil o serpentín tomando en cuenta las diferentes variables como la masa de hielo, la temperatura de salida del fluido que transfiere, entre otras y comparándolas con los diferentes valores experimentales que permitieron conocer el almacenamiento total de energía llevando a concluir que en gran medida la capacidad de almacenamiento y la eficiencia energética y exergética del sistema se verán afectadas por la temperatura del fluido que transfiere calor y la longitud del tubo usado como serpentín.

Lee y Jones³⁰ también toman como referencia un sistema de almacenamiento de energía térmica por hielo de tipo ice-on-coil, pero realizan un modelo analítico básico de la transferencia de calor de este y las características de los procesos de carga y descarga obteniendo con ello la carga refrigerada del modelo y el volumen de hielo en este sistema. Soltan y Ardehali³¹ también abordan este tipo de sistema, pero lo que buscan es desarrollar un modelo numérico simulado que permita determinar la cantidad de tiempo requerida para solidificar el agua alrededor de una sección transversal del tubo usado en esta configuración de almacenamiento a través de un análisis de la transferencia de masa y calor, que

²⁹ EZAN, Mehmet, EREK, Aytunç & DINCER, Ibrahim. Energy and exergy analyses of an ice-on-coil thermal energy storage system. Energy, 2011

³⁰ LEE, Alex & JONES, Jerold. Modeling of an ice-on-coil thermal energy storage system. Energy Conversion and Management, 1996

³¹ SOLTAN, Babak & ARDEHALI, Morteza. Numerical simulation of water solidification phenomenon for ice-on-coil thermal energy storage application.

en el caso de formarse 1 mm de hielo alrededor del tubo es de 39,6s y uno de 10 mm es de 2609,4s.

Hajiah y Krarti³² realizan un ambiente simulado que evalúa los beneficios de usar de manera simultánea la capacitancia térmica de un edificio y un sistema de almacenamiento de hielo para reducir los costos operativos, manteniendo al mismo tiempo las condiciones de confort en edificios comerciales y comparando estos resultados con pruebas experimentales realizadas en un laboratorio de Boulder, Colorado en donde se logra, con el uso de la simulación, una reducción de costos del 10% frente a lo abordado experimental.

Desde otro punto, Kiatsiriroat et al³³ realizan un trabajo en donde estudian las características de la transferencia de calor de un evaporador por contacto directo usado en el almacenamiento térmico de energía por hielo mediante la inyección de dos refrigerantes (R12 y R22) en agua contenida en un tanque de almacenamiento para intercambiar calor favoreciendo la formación de hielo y logrando así predecir la temperatura del agua en cualquier momento. Junto a este estudio, Rahdar et al³⁴ investigan la integración de un sistema de almacenamiento térmico de energía (ITES) con un sistema de aire acondicionado usado en un edificio de oficinas con el uso de R-134a y R-717 mediante dos algoritmos de optimización multi – objetivo: Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II (NSGA-II) y Multi-Objective

³² HAJIAH, Ali & KRARTI, Moncef. Optimal control of building storage systems using both ice storage and thermal mass – Part I: Simulation environment. Energy Conversion and Management, 2012

³³ KIATSIRIROAT. T et al. Heat transfer prediction for a direct contact ice thermal energy storage. Energy Conversion and Management, 2003

³⁴ RAHDAR. Mohammad, et al. Modeling and optimization of R-717 and R-134a ice thermal energy storage air conditioning systems using NSGA-II and MOPSO algorithms. Applied Thermal Engineering, 2016

Particle Swarm Optimization (MOPSO), que permiten concluir que el ITES para aire acondicionado es una buena opción sobre todo desde el punto de vista económico.

Rahdar, Emamzadeh y Ataei³⁵ modelan y analizan exérgica, económica y ambientalmente un sistema de aire acondicionado por compresión de vapor abordando este sistema de manera individual e híbrida con el uso dos sistemas (almacenamiento térmico de energía usando hielo – ITES y almacenamiento mediante un tanque con un material que intercambia de fase – Phase Change Material o PCM) haciendo uso de un algoritmo genético denominado HGS - II desarrollado en MATLAB obteniendo como resultados un consumo energético anual de 4,59% para el ITES y 7,58% para el PCM frente al sistema convencional con una reducción de emisiones de CO₂ de 17,8% y 27,2%, una eficiencia exérgica del 46,93% y 53,44%, un costo total óptimo de 0,48 y 0,80 millones de dólares y un retorno de la inversión de 3,16 y 5,56 años respectivamente.

Ruan et al³⁶ elaboran un modelo de optimización de programación lineal simple en donde se compara una planta combinada de calentamiento, enfriamiento y generación de potencia (BCHP) tanto con ayuda del almacenamiento térmico de energía con hielo (ISS) como sin él en un edificio de la ciudad de Shangai evaluando el impacto del precio de funcionamiento utilizando un motor convencional, uno con gas natural y otro eléctrico en donde se menciona que el

³⁵ RAHDAR. Mohammad, EMAMZADEH. Abolghasem & ATAEI, Abtin. A comparative study on PCM and ice thermal energy storage tank for air-conditioning systems in office buildings. Applied Thermal Engineering, 2016

³⁶ RUAN. Yingjun, et al. Optimization and analysis of Building Combined Cooling, Heating and Power (BCHP) plants with chilled ice thermal storage system. Applied Energy, 2016

precio del gas es el factor más importante desde el punto de vista económico de la BHP, pero se agrega, con base en los resultados, que esta combinación BHP con ISS no permiten una reducción energética y beneficios ambientales considerables, ya que la BHP llega a satisfacer de mejor manera la demanda de calor que la de frío.

Eames, Worall y Shenyi Wu³⁷ describen y evalúan los resultados de una investigación experimental que integra en un novedoso ciclo de refrigeración con bomba de chorro con un sistema de almacenamiento térmico de energía por hielo, que produce hielo a través de una presión de vacío en un recipiente hermético al que se rocía agua logrando conseguir un COP en el proceso de formación del hielo bajo esta técnica de 0,162, aunque aclarando que este valor es 60% de lo que podría ser si el recipiente y la tubería de succión de la bomba fueran cuidadosamente diseñados.

Abdullah, et al³⁸ estudian un sistema de enfriamiento distrital (DCS) en una universidad al sur este de Asia en donde con el uso de un sistema con y sin almacenamiento térmico de hielo pueda ser usado como climatizador y con ello reducir la tarifa de energía eléctrica que con lo obtenido tras la investigación es del orden de entre 1,26 y 2,43% cuando el sistema de almacenamiento está operando en las horas de baja demanda energética (12:00p.m – 6:00 a.m).

³⁷ EAMES. Ian , WORALL. Mark y Wu, Shenyi. An experimental investigation into the integration of a jet-pump refrigeration cycle and a novel jet-spray thermal ice storage system. Applied Thermal Engineering, 2013

³⁸ ABDULLAH. Mohammad, et al. Electricity cost saving comparison due to tariff change and ice thermal storage (ITS) usage based on a hybrid centrifugal-ITS system for buildings: A university district cooling perspective. Energy and Buildings, 2013

Adicionalmente, Augusto, Culaba y Maglaya³⁹ presentan dos modelos de distribución de red de un sistema de refrigeración distrital (district cooling system) con sistema de almacenamiento térmico de energía por hielo (ITES) que mediante una simulación y cálculos hidráulicos permite desarrollar un criterio de diseño de la red de tuberías que permita un mínimo costo total del sistema.

Por otro lado, Liu et al⁴⁰ realizan una investigación con el objetivo de estudiar la solidificación del agua y una solución de cloruro de sodio (NaCl) como inhibidor en diferentes superficies de materiales (aluminio, cobre y teflón) midiendo los ángulos de contacto y el sub enfriamiento de este líquido para entender los factores clave dentro del proceso de solidificación facilitando su uso en un sistema de almacenamiento de energía de hielo escarchado (ice slurry), mencionando que el cobre es el material con mayor temperatura de congelamiento debido a su conductividad térmica.

Xie y Yuan⁴¹ desarrollan un estudio numérico en donde se abordan la simulación de la formación de hielo en un ITES típico para predecir la distribución de temperatura del fluido y con ello diseñar una estructura de tipo thin layer ring que favorezca la formación de hielo, la cual depende en gran medida del material, espesor y distribución mostrando que el cobre presenta el mejor rendimiento frente

³⁹ AUGUSTO, Gerardo, CULABA, Alvin & MAGLAYA, Archie. Identification of Design Criteria for District Cooling Distribution Network with Ice Thermal Energy Storage System. Energy Procedia, 2015

⁴⁰ LIU, Shengchun, et al. Impacts on the solidification of water on plate surface for cold energy storage using ice slurry. Applied Energy, 2017

⁴¹ XIE, Junling & YUAN, Chris. Numerical study of thin layer ring on improving the ice formation of building thermal storage system. Applied Thermal Engineering, 2014

a otros materiales, el espesor debe ser de 3 mm y la distribución debe ser de tipo espacio frente a la paralela y doblemente paralela.

Xie y Yuan ⁴² realizan además otro estudio, en el cual evalúan y optimizan los parámetros de una lámina usada en los ITES dentro del tanque de este sistema denominada thin layer ring para favorecer la transferencia de calor, con la ayuda del método de Taguchi, mediante nueve combinaciones de material, espesor y distribución, analizando a su vez el área de hielo generada, destacando que el espesor es el factor o parámetro que menos influencia tiene dentro del área de producción de hielo.

Por otro lado, Kuyumcu, Tutumlu y Yumturas⁴³ desarrollan un modelo analítico – computacional con la superposición de Duhamel, las técnicas de transformación de similitud y el software MATLAB para obtener el rendimiento de un sistema de calefacción de piscinas en Turquía mediante el uso del calor residual rechazado de una unidad enfriadora usada una pista de hielo, el cual es posteriormente almacenado en un tanque subterráneo de almacenamiento de energía térmica (TES) logrando con ello determinar el rendimiento a lo largo del tiempo del sistema de calefacción junto con valores térmicos relacionados con los componentes de la pista, destacando principalmente que el tamaño de la pista debe ser de 475 m² para obtener un rendimiento adecuado y ser usado en una piscina semi – olímpica de 625 m².

⁴² XIE, Junling & YUAN, Chris. Parametric study of ice thermal storage system with thin layer ring by Taguchi method. Applied Thermal Engineering, 2016

⁴³ KUYUMCU. Muhammed, TUTUMLU. Hakan & YUMTURAS, Recep. Performance of a swimming pool heating system by utilizing waste energy rejected from an ice rink with an energy storage tank. Energy Conversion and Management, 2016

Luo et al⁴⁴ implementan una novedosa estrategia de control óptimo a través de un algoritmo de programación cuadrática secuencial para determinar el rendimiento y minimizar los costos operativos de un TES usado en un centro comercial obteniendo una reducción del consumo energético del 11,3% por día y 9,3% mensual, frente a tres estrategias heurísticas (chiller-priority, ice-priority y price-priority) tomadas como referencia en otras investigaciones.

Jannesari y Abdollahi⁴⁵ presentan un estudio en el cual comparan dos métodos de transferencia de calor (usando anillos delgados – thin rings y aletas anulares – annular fins) frente al convencional (tubo simple) usados para solucionar el problema de la transferencia de calor en el proceso de descarga de un sistema de almacenamiento térmico de energía por hielo de tipo ice-on-coil, destacando que usando la configuración de aletas anulares se necesita una separación entre estas de 50 mm para tener un punto adecuado de operación, lo que a su vez permite un aumento en la formación de hielo del 21% en las aletas y de 34% en el caso de los anillos frente al convencional con una velocidad de enfriamiento del orden de 15% con estas dos configuraciones comparadas con el sistema convencional.

Finalmente, Wang et al⁴⁶ desarrollan una estrategia de control mediante un modelo matemático de una dimensión cuasi estable que permite predecir el tiempo de uso efectivo de un sistema de almacenamiento de hielo (ITSS) de circulación

⁴⁴ LUO. Na, et al. Data analytics and optimization of an ice-based energy storage system for commercial buildings. Applied Energy, 2017

⁴⁵ JANNESARI, Hamid & ABDOLLAHI, Naeim. Experimental and numerical study of thin ring and annular fin effects on improving the ice formation in ice-on-coil thermal storage systems. Applied Energy, 2017

⁴⁶ WANG. Shu, et al. Discharging performance of a forced-circulation ice thermal storage system for a permanent refuge chamber in an underground mine. Applied Thermal Engineering, 2017

forzada usado en una cámara de refugio para 50 personas dentro de una mina, el cual resulta ser de aproximadamente 64,57 horas y que se ve afectado principalmente, según el estudio, por la carga de calor aportada por las personas y objetos dentro de la cámara.

6.5 Características presentadas en los estudios

Con base en los documentos abordados en el paso anterior, se destaca que las características o tendencias principales que predominan en dichos artículos son:

- Para el caso de los estudios de tipo histórico, se destacan que en su mayoría se han abordado modelos numéricos computacionales, con el uso adicional de algoritmos, herramientas matemáticas y simulaciones computacionales, con la finalidad de contribuir con el diseño de sistemas de almacenamiento térmico de energía usando hielo abordando problemáticas relacionadas con el rendimiento, los costos operativos y los efectos ambientales, además de estudiar su implementación en aplicaciones ligadas principalmente con el aire acondicionado en edificios de oficinas, centros comerciales y hospitales.
- Por otro lado, tomando los estudios realizados en un periodo de cinco años se evidencia que se sigue teniendo presente a la simulación numérica computacional como herramienta fundamental para realizar estudios y análisis de condiciones de operación, aunque enfocándose en la

integración de estos sistemas con otros usados en la generación eléctrica y aire acondicionado, con la incorporación de experimentos ligados con algunos componentes de estos sistemas junto a fenómenos como el comportamiento que presenta el agua en el proceso de carga y descarga principalmente en sistemas de tipo encapsulado y ice-on-coil.

Sintetizando, se destacan como características recurrentes en los trabajos abordados temas enfocados en modelos matemáticos con el uso de algoritmos, acompañados de simulaciones computacionales a través de softwares especializados que permiten la toma de decisiones con base en ciertas combinaciones, criterios y escenarios, analizando aspectos térmicos, económicos y ambientales los cuales en muchos casos se complementan con experimentos centrados en la integración entre sistemas, uso de ciertos materiales e implementación de técnicas o distribuciones diferentes que permitan mejorar la transferencia de calor, el tiempo de cambio de fase, etc. Lo que permite obtener mejoras considerables en el rendimiento de algún componente del sistema tratado o de todo este favoreciendo su costo operativo, el consumo energético y el impacto ambiental.

6.6 Oportunidades de investigación

Se nota que los estudios presentan una tendencia a la simulación de escenarios en los cuales se puedan implementar cualquier sistema de almacenamiento térmico de energía por hielo, analizando estrategias de optimización mediante el

uso de algoritmos que permitan conocer desde ecuaciones y modelos computacionales la rentabilidad partiendo de aspectos propios del rendimiento térmico y los costos operativos de estos sistemas, por lo que sin duda esta sigue siendo un buen nicho de investigación al ser aplicable en diferentes tipos de edificaciones y aplicaciones.

Sin embargo, se hace necesario abordar y ejecutar estudios enfocados en la integración de otros sistemas, sobre todo aquellos que incorporen energías renovables, como la solar, junto a sistemas existentes de almacenamiento térmico de energía por hielo, en donde se puedan explorar los beneficios tanto económicos como ambientales junto con el estudio de nuevos materiales y configuraciones que permitan un mejor almacenamiento de energía y sobre todo aislamiento.

Adicionalmente, existen posibilidades de abordar los diferentes tipos de almacenamiento térmico de energía con el hielo a través revisiones investigativas, ya que en su mayoría se encuentran documentos de tipo investigativo, que describan con mayor profundidad la importancia de cada uno, la rentabilidad que ofrecen y las posibles de implementación en casos o aplicaciones puntuales tanto en la parte de climatización como en muchas otras áreas afines a esta, logrando con ello realizar fases experimentales en las que se obtengan óptimos resultados.

8. DISCUSIÓN

El almacenamiento térmico de energía, y en particular el relacionado con el uso y producción de hielo, ha permitido un avance considerable en lo referente con la reducción del alto consumo de energía eléctrica y con ello ha favorecido los costos operativos y el impacto al ambiente, lo cual ha llevado a considerarlo como una alternativa atractiva entre los consumidores que cada vez ven su relevancia en el sistema energético mundial siendo aplicado en diferentes países como Malasia Rismanchi et al⁴⁷, ciudades como Nueva York⁴⁸ e incluso en minas como se pudo ver en la investigación abordada y en un trabajo adicional realizado por Du, et al⁴⁹. Esto ha logrado un avance considerable en la integración de estos sistemas con aquellos que usan otros tipos de energía como la solar fotovoltaica como lo muestran Yongfeng et al⁵⁰ y Saffari et al⁵¹ junto a aquellos estudios de tipo económico en donde se hace uso de modelos matemáticos que permiten conocer su confiabilidad como lo hacen Song et al⁵², con lo que se demuestra la necesidad de utilizar diferentes herramientas ideas y alternativas para solucionar problemáticas actuales.

⁴⁷ RISMANCHI. B, et al. Thermodynamic evaluation of utilizing different ice thermal energy storage systems for cooling application in office buildings in Malaysia. *Energy and Buildings*, 2012

⁴⁸ ZHU, Wenqian. New York buildings beat the heat with ice. Disponible en <http://money.cnn.com/2013/07/30/news/companies/new-york-ice-cooling/index.html>. Citado el 23 de febrero de 2018

⁴⁹ DU. Yan, et al. Thermal comfort model analysis and optimization performance evaluation of a multifunctional ice storage air conditioning system in a confined mine refuge chamber. *Energy*, 2017

⁵⁰ YONGFENG. Xu, et al. Experimental investigation of solar photovoltaic operated ice thermal storage air-conditioning system. *International Journal of Refrigeration*, 2018.

⁵¹ SAFFARI. Mohammad, et al. Optimized demand side management (DSM) of peak electricity demand by coupling low temperature thermal energy storage (TES) and solar PV. *Applied Energy*, 2018

⁵² SONG. Xu, et al. Study of economic feasibility of a compound cool thermal storage system combining chilled water storage and ice storage. *Applied Thermal Engineering*, 2018

Sin embargo, la tendencia se ha mantenido enfocada en simulaciones y modelos matemáticos que abordan aspectos como el proceso de carga y descarga de un sistema de almacenamiento de energía con el uso de ciertos métodos que estudien este caso como el Método de entramado de dos fluidos de Boltzmann que abordan Lin, et al⁵³, además de estudios centrados en la transferencia de calor en estos sistemas como el planteado por Kiatsiriroat⁵⁴, el rendimiento dinámico del crecimiento de hielo⁵⁵, entre otros, a los que se suman experimentos como el realizado por Lee y Jones⁵⁶ para determinar el rendimiento de un sistema de almacenamiento de energía con el uso del hielo en la configuración ice-on-coil en aplicaciones domésticas o de bajo consumo e incluso trabajos aplicados como el tratado por Yang y Yeh⁵⁷ en donde se restaura un sistema de almacenamiento térmico de energía por hielo para ser usado e integrado a un sistema de aire acondicionado en un acuario.

Cabe destacar, que aunque se han realizado gran cantidad de trabajos referentes al tema puntual de investigación, la relevancia que el almacenamiento térmico de energía tiene en el mundo sigue en aumento, por lo que se requiere de mayores avances investigativos que permitan profundizar aún más desde revisiones investigativas o artículos de revisión los diferentes tipos de sistemas de

⁵³ LIN. Qi, et al. Simulation of the Melting Process of Ice Slurry for Energy Storage Using a Two-Fluid Lattice Boltzmann Method. Energy Procedia, 2017

⁵⁴ KIATSIRIROAT. T, et al. Heat transfer prediction for a direct contact ice thermal energy storage. Energy Conversion and Management, 2003

⁵⁵ YAN. C, et al. A seasonal cold storage system based on separate type heat pipe for sustainable building cooling. Renewable Energy, 2016

⁵⁶ LEE, Alex & JONES, Jerold. Laboratory performance of an ice-on-coil, thermal-energy storage system for residential and light commercial applications. Energy, 1996

⁵⁷ YANG, K.H & YEH, T. C. Renovation of an ice storage AC system in an aquarium for energy conservation. Building and Environment, 2007

almacenamiento térmico usando hielo partiendo de trabajos como el realizado por Sarbu y Sebarchievici⁵⁸ en torno al almacenamiento térmico de energía y su sostenibilidad junto con el de Zalba, et al⁵⁹ que estudian los materiales con cambio de fase, análisis de la transferencia de calor y sus aplicaciones o el ejecutado por Saito⁶⁰ estudiando los avances recientes en un sistema similar al tratado denominado cold thermal energy storage, pero enfocados exclusivamente en el almacenamiento térmico de energía a través de la producción de hielo.

Adicionalmente, se deben tener en cuenta que la incorporación cada vez mayor de los denominados materiales con cambio de fase (PCM) y su intensivo uso en el almacenamiento térmico sigue siendo un factor necesario que ha llevado a la elaboración de trabajos como el realizado por Kasaeian et al⁶¹, lo que los lleva a ser considerados una tendencia y un posible reemplazado de ciertos materiales necesarios en procesos de almacenamiento de energía.

⁵⁸ SARBU, Ioan & SEBARCHIEVICI, Calin. A Comprehensive Review of Thermal Energy Storage. Sustainability, 2018

⁵⁹ ZALBA, Belén. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. Applied Thermal Engineering, 2003

⁶⁰ SAITO, Akio. Recent advances in research on cold thermal energy storage. International Journal of Refrigeration, 2002

⁶¹ KASAEIAN, Alibakhsh, et al. Experimental studies on the applications of PCMs and nano-PCMs in buildings: A critical review. Energy and Buildings, 2017

9. CONCLUSIONES

- El uso de modelos computacionales dentro de la temática tratada es una alternativa a considerarse, ya que permite la simulación de escenarios, condiciones y procesos determinando entre otras consideraciones un adecuado rendimiento, una óptima rentabilidad y una mejora en el ambiente.
- Se hace necesario la integración este tipo de almacenamiento de energía dentro de la red energética del mundo con la ayuda de energías renovables, con el fin de mitigar en gran medida los efectos contaminantes en el ambiente y favorecer a su vez el costo económico.
- El almacenamiento térmico de energía mediante la producción o utilización de hielo, bajo los parámetros y resultados de búsqueda obtenidos, sigue siendo vigente entre la comunidad científica, por lo que requiere de un mayor número de publicaciones, sobre todo de tipo review o revisión literaria que aborde en profundidad este tipo de tecnología.

10. REFERENCIAS

A smart Ice Bear battery. [En línea]. Estados Unidos: Ice Energy. Disponible en <https://www.ice-energy.com/technology/>

ABDULLAH. Mohammad, et al. Electricity cost saving comparison due to tariff change and ice thermal storage (ITS) usage based on a hybrid centrifugal-ITS system for buildings: A university district cooling perspective, Energy and Buildings, Volume 67, December 2013, Pages 70-78, ISSN 0378-7788, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.08.008>.

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778813005057>)

ARTECONI. A, HEWITT, N.J & POLONARA, F. State of the art of thermal storage for demand-side management, Applied Energy, Volume 93, 2012, Pages 371-389, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.12.045>.

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261911008415>)

AUGUSTO. Gerardo, CULABA. Alvin & MAGLAYA, Archie. , Identification of Design Criteria for District Cooling Distribution Network with Ice Thermal Energy Storage System, Energy Procedia, Volume 79, November 2015, Pages 233-238, ISSN 1876-6102, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.470>.

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187661021502202X>)

BAC Ice Thermal Storage. [En línea]. Estados Unidos: Emerson Swan. Disponible en <http://www.emersonswan.com/manufacturers-products/bac-ice-thermal-storage.html>

CHAICHANA. Chatchawa, CHARTERS. William & AYE, Lu. An ice thermal storage computer model, Applied Thermal Engineering, Volume 21, Issue 17, December 2001, Pages 1769-1778, ISSN 1359-4311, [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(01\)000461](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(01)000461).

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431101000461>)

CHEN. Huei-Jiunn, WANG. David & CHEN, Sih-Le. Optimization of an ice-storage air conditioning system using dynamic programming method, Applied Thermal Engineering, Volume 25, Issues 2–3, 2005, Pages 461-472, ISSN 1359-4311, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2003.12.006>.

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431103003995>)

CHIDAMBARAM. L.A, et al. Review of solar cooling methods and thermal storage options, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 15, Issue 6, 2011, Pages 3220-3228, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.04.018>.

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032111001559>)

DU. Yan, et al. Thermal comfort model analysis and optimization performance evaluation of a multifunctional ice storage air conditioning system in a confined mine refuge chamber, Energy, Volume 141, 15 December 2017, Pages 964-974, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.09.123>.

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544217316432>)

EAMES, Ian & ADREF, Kamel. Freezing and melting of water in spherical enclosures of the type used in thermal (ice) storage systems, Applied Thermal Engineering, Volume 22, Issue 7, May 2002, Pages 733-745, ISSN 1359-4311,

[https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(02\)000261](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)000261).

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431102000261>)

EAMES. Ian , WORALL. Mark y Wu, Shenyi. An experimental investigation into the integration of a jet-pump refrigeration cycle and a novel jet-spray thermal ice storage system, *Applied Thermal Engineering*, Volume 53, Issue 2, 2 May 2013, Pages 285-290, ISSN 1359-4311, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.02.015>.

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431112001111>)

ELTON, Jeremy. Cool Idea: Using Ice to Chill Buildings in NYC. [En línea]. Estados Unidos: Treehugger. Disponible en <https://www.treehugger.com/clean-technology/cool-idea-using-ice-to-chill-buildings-in-nyc.html>

EREK, Aytunc & DINCER, Ibrahim. Numerical heat transfer analysis of encapsulated ice thermal energy storage system with variable heat transfer coefficient in downstream, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 52, Issues 3–4, 31 January 2009, Pages 851-859, ISSN 0017-9310, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.06.024>.

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931008004043>)

EZAN. Mehmet, EREK. Aytunç & DINCER, Ibrahim. Energy and exergy analyses of an ice-on-coil thermal energy storage system, *Energy*, Volume 36, Issue 11, November 2011, Pages 6375-6386, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.09.036>.

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544211006438>)

HAIJIAH, Ali & KRARTI, Moncef. Optimal control of building storage systems using both ice storage and thermal mass – Part I: Simulation environment, Energy Conversion and Management, Volume 64, December 2012, Pages 499-508, ISSN 0196-8904, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.02.016>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890412000799>)

HENDERSON, Greg. Ice Thermal Storage System [En línea]. Estados Unidos: B.A.C (Baltimore Aircoil Company). Disponible en http://www.ashraebistate.org/sites/default/files/events/ice_storage_systems.pdf

HENZE, Gregor, KRARTI, Moncef & BRANDEMUE, Michael. Guidelines for improved performance of ice storage systems, Energy and Buildings, Volume 35, Issue 2, 2003, Pages 111-127, ISSN 0378-7788, [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00140-2](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00140-2). (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778801001402>)

IceBank Benefits. How Thermal Energy Storage Works. Estados Unidos: CALMAC. Disponible en <http://www.calmac.com/how-energy-storage-works>

JANNESARI, Hamid & ABDOLLAHI, Naeim. Experimental and numerical study of thin ring and annular fin effects on improving the ice formation in ice-on-coil thermal storage systems, Applied Energy, Volume 189, 1 March 2017, Pages 369-384, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.064>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261916318281>)

KASAEIAN, Alibakhsh, et al. Experimental studies on the applications of PCMs and nano-PCMs in buildings: A critical review, Energy and Buildings, Volume 154, 2017, Pages 96-112, ISSN 0378-7788,

<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.037>.

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778817321564>)

KIATSIRIROAT. T et al. Heat transfer prediction for a direct contact ice thermal energy storage, *Energy Conversion and Management*, Volume 44, Issue 4, March 2003, Pages 497-508, ISSN 0196-8904, [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(02\)000778](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(02)000778).

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890402000778>)

KIATSIRIROAT. T, et al. Heat transfer prediction for a direct contact ice thermal energy storage, *Energy Conversion and Management*, Volume 44, Issue 4, 2003, Pages 497-508, ISSN 0196-8904, [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(02\)000778](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(02)000778).

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890402000778>)

KUYUMCU. Muhammed, TUTUMLU. Hakan & YUMTURAS, Recep. Performance of a swimming pool heating system by utilizing waste energy rejected from an ice rink with an energy storage tank, *Energy Conversion and Management*, Volume 121, 1 August 2016, Pages 349-357, ISSN 0196-8904, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.05.049>.

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890416304277>)

LEE, Alex & JONES, Jerold. Laboratory performance of an ice-on-coil, thermal-energy storage system for residential and light commercial applications, *Energy*, Volume 21, Issue 2, February 1996, Pages 115-130, ISSN 0360-5442,

[https://doi.org/10.1016/0360-5442\(95\)00095-X](https://doi.org/10.1016/0360-5442(95)00095-X).

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/036054429500095X>)

LEE, Alex & JONES, Jerold. Modeling of an ice-on-coil thermal energy storage system, *Energy Conversion and Management*, Volume 37, Issue 10, October 1996, Pages 1493-1507, ISSN 0196-8904, [https://doi.org/10.1016/0196-8904\(95\)002243](https://doi.org/10.1016/0196-8904(95)002243).

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0196890495002243>)

LIN. Qi, et al. Simulation of the Melting Process of Ice Slurry for Energy Storage Using a Two-Fluid Lattice Boltzmann Method, *Energy Procedia*, Volume 121, 2017, Pages 110-117, ISSN 1876-6102, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.007>.

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217334616>)

LIU. Shengchun, et al. Impacts on the solidification of water on plate surface for cold energy storage using ice slurry, *Applied Energy*, Available online 10 August 2017, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.012>.

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917310279>)

LUO. Na, et al. Data analytics and optimization of an ice-based energy storage system for commercial buildings, *Applied Energy*, Volume 204, 15 October 2017, Pages 459-475, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.07.048>.

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917309224>)

NORDELL, Bo. 8 - Using ice and snow in thermal energy storage systems, In Woodhead Publishing Series in Energy, edited by Luisa F. Cabeza,, Woodhead Publishing, 2015, Pages 187-200, Advances in Thermal Energy Storage Systems, ISBN 9781782420880, <https://doi.org/10.1533/9781782420965.2.187>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781782420880500080>)

OLIVER. A, NEILA, F.J & GARCÍA – SANTOS, A. Clasificación y selección de materiales de cambio de fase según sus características para su aplicación en sistemas de almacenamiento de energía térmica. Materiales de Construcción Vol. 62, 305, 131-140 enero-marzo 2012 ISSN: 0465-2746 (<http://oa.upm.es/19031/>)

ORO. E, et al. Review on phase change materials (PCMs) for cold thermal energy storage applications, Applied Energy, Volume 99, 2012, Pages 513-533, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.03.058>.
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S03062619120027>)

PÉREZ, Jorge. Revisión sistemática de literatura en ingeniería. Colombia: Editorial Universidad de Antioquia. 2012 p. 1-89.

RAHDAR. Mohammad, EMAMZADEH. Abolghasem & ATAEL, Abtin. A comparative study on PCM and ice thermal energy storage tank for air-conditioning systems in office buildings, Applied Thermal Engineering, Volume 96, 5 March 2016, Pages 391-399, ISSN 1359-4311, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.11.107>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431115013551>)

RAHDAR. Mohammad, et al. Modeling and optimization of R-717 and R-134a ice thermal energy storage air conditioning systems using NSGA-II and MOPSO algorithms, Applied Thermal Engineering, Volume 96, 5 March 2016, Pages 217-227, ISSN 1359-4311, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.11.068>.

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431115013149>)

RISMANCHI. B, et al. Thermodynamic evaluation of utilizing different ice thermal energy storage systems for cooling application in office buildings in Malaysia, Energy and Buildings, Volume 53, October 2012, Pages 117-126, ISSN 0378-7788, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.06.013>.

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778812003003>)

RUAN. Yingjun, et al. Optimization and analysis of Building Combined Cooling, Heating and Power (BCHP) plants with chilled ice thermal storage system, Applied Energy, Volume 179, 1 October 2016, Pages 738-754, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.009>.

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261916309503>)

SAFFARI. Mohammad, et al. Optimized demand side management (DSM) of peak electricity demand by coupling low temperature thermal energy storage (TES) and solar PV, Applied Energy, Volume 211, 2018, Pages 604-616, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.11.063>.

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917316616>)

SAITO, Akio. Recent advances in research on cold thermal energy storage, International Journal of Refrigeration, Volume 25, Issue 2, 2002, Pages 177-189, ISSN 0140-7007, [https://doi.org/10.1016/S0140-7007\(01\)00078-0](https://doi.org/10.1016/S0140-7007(01)00078-0). (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140700701000780>)

SANAYE, Sepehr & SHIRAZI, Ali. Thermo-economic optimization of an ice thermal energy storage system for air-conditioning applications, Energy and Buildings, Volume 60, May 2013, Pages 100-109, ISSN 0378-7788, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.12.040>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778813000133>)

SANAYE. Sepehr, FARDAD. Abbasali & MOSTAKHDEMI, Masoud. Thermoeconomic optimization of an ice thermal storage system for gas turbine inlet cooling, Energy, Volume 36, Issue 2, February 2011, Pages 1057-1067, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.12.002>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544210006924>)

SARBU, Ioan & SEBARCHIEVICI, Calin. A Comprehensive Review of Thermal Energy Storage. Sustainability 2018, 10, 191. (<http://www.mdpi.com/2071-1050/10/1/191>)

SEBZALI , M.J & RUBINI, P.A. Analysis of ice cool thermal storage for a clinic building in Kuwait, Energy Conversion and Management, Volume 47, Issues 18–19, November 2006, Pages 3417-3434, ISSN 0196-8904,

<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.12.013>.

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890406000136>)

SEHAR. Fakeha, RAHMAN. Saifur & PIPATTANASOMPORN, Manisa. Impacts of ice storage on electrical energy consumptions in office buildings, *Energy and Buildings*, Volume 51, 2012, Pages 255-262, ISSN 0378-7788, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.05.002>.

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778812002575>)

SHIRAZI. Ali, et al. Thermal–economic–environmental analysis and multi-objective optimization of an ice thermal energy storage system for gas turbine cycle inlet air cooling, *Energy*, Volume 69, 1 May 2014, Pages 212-226, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.071>.

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544214002059>)

SOLTAN, Babak & ARDEHALI, Morteza. Numerical simulation of water solidification phenomenon for ice-on-coil thermal energy storage application, *Energy Conversion and Management*, Volume 44, Issue 1, January 2003, Pages 85-92, ISSN 0196-8904, [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(02\)000419](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(02)000419).

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890402000419>)

SONG. Xu, et al. Study of economic feasibility of a compound cool thermal storage system combining chilled water storage and ice storage, *Applied Thermal Engineering*, Volume 133, 2018, Pages 613-621, ISSN 1359-4311, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.01.063>. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431117344022>)

The NEWS. The Benefits of Ice Thermal Storage. [En línea]. Estados Unidos. Disponible en <https://www.achrnews.com/articles/100644-the-benefits-of-ice-thermal-storage>.

Thermal Storage Technology. [En línea]. Japón: Global Environment Centre Foundation. Disponible en http://nett21.gec.jp/ESB_DATA/EN/Tech/html/esb-123.html

WANG, M.J & KUSUMOTO, N. Ice slurry based thermal storage in multifunctional buildings. Heat and Mass Transfer, (2001) 37: 597. <https://doi.org/10.1007/PL00005891>

(<https://link.springer.com/article/10.1007%2FPL00005891>)

WANG. Shu, et al. Discharging performance of a forced-circulation ice thermal storage system for a permanent refuge chamber in an underground mine, Applied Thermal Engineering, Volume 110, 5 January 2017, Pages 703-709, ISSN 1359-4311, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.192>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431116315514>)

WU. Chung-Tai, TSAI. Yao-Hsu. Design of an ice thermal energy storage system for a building of hospitality operation, International Journal of Hospitality Management, Volume 46, 2015, Pages 46-54, ISSN 0278-4319, <https://doi.org/10.1016/j.ijhm.2015.01.005>.

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278431915000067>)

XIE, Junling & YUAN, Chris. Numerical study of thin layer ring on improving the ice formation of building thermal storage system, Applied Thermal Engineering, Volume 69, Issues 1–2, August 2014, Pages 46-54, ISSN 1359-4311,

<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.04.053>.

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431114003172>)

XIE, Junling & YUAN, Chris. Parametric study of ice thermal storage system with thin layer ring by Taguchi method, Applied Thermal Engineering, Volume 98, 5 April 2016, Pages 246-255, ISSN 1359-4311, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.12.038>.

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431115014192>)

YAN, et al. A seasonal cold storage system based on separate type heat pipe for sustainable building cooling, Renewable Energy, Volume 85, 2016, Pages 880-889, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.023>.

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148115301191>)

YANG, K.H & YEH, T. C. Renovation of an ice storage AC system in an aquarium for energy conservation, Building and Environment, Volume 42, Issue 4, April 2007, Pages 1851-1861, ISSN 0360-1323, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.02.009>.

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132306000497>)

YAU, Y.H & LEE, S.K. Feasibility study of an ice slurry-cooling coil for HVAC and R systems in a tropical building, Applied Energy, Volume 87, Issue 8, 2010, Pages 2699-2711, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.02.025>.

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261910000565>)

YONGFENG. Xu, et al. Experimental investigation of solar photovoltaic operated ice thermal storage air-conditioning system, International Journal of Refrigeration, Volume 86, 2018, Pages 258-272, ISSN 0140-7007, <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2017.11.035>.

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140700717304905>)

ZALBA, Belén. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications, Applied Thermal Engineering, Volume 23, Issue 3, 2003, Pages 251-283, ISSN 1359-4311, [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(02\)001928](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)001928).

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431102001928>)

ZHU, Wenqian. New York buildings beat the heat with ice. Estados Unidos: CNN Money. Disponible en <http://money.cnn.com/2013/07/30/news/companies/new-york-ice-cooling/index.html>.