

Recibido: 26.11.2024 • Aceptado: 18.06.2026

Palabras clave: Refrigeración magnética, tecnología ecológica, materiales magnetocalóricos.

La refrigeración magnética, una alternativa ecológica

VERÓNICA ELVIRA SALAZAR MUÑOZ

ÁREA DE METALURGIA Y MATERIALES, FACULTAD DE INGENIERÍA, UASLP

veronica.salazar@uaslp.mx

IVONNE KADO MERCADO ELÍAS

FACULTAD DE INGENIERÍA, UASLP

ivonne.elias@uaslp.mx

SALVADOR ANTONIO PALOMARES SÁNCHEZ

FACULTAD DE CIENCIAS, UASLP

sapasa04@ciencias.uaslp.mx

En este trabajo se presenta la refrigeración magnética, una tecnología ecológica que constituye una alternativa a los sistemas de refrigeración convencionales, los cuales son altamente contaminantes. Se destaca la importancia de la refrigeración en la vida cotidiana del ser humano y se subrayan las investigaciones realizadas para encontrar soluciones más sostenibles. También se aborda el funcionamiento de la refrigeración magnética, basada en el efecto magnetocalórico de ciertos materiales, fenómeno que constituye el enfoque de nuestras investigaciones.

ABSORCIÓN DE CALOR

CAMPO
MAGNÉTICO
APLICADO

MATERIAL
MAGNETOCALÓRICO

S

La refrigeración es esencial para la vida humana. Es indispensable para conservar alimentos como quesos, leche, carnes y pescados, que deben transportarse en camiones refrigerados. También desempeña un papel fundamental para conservar medicamentos y vacunas en buen estado. Además, los sistemas de aire acondicionado y muchas máquinas industriales requieren refrigeración, utilizando chillers o intercambiadores de calor para evitar daños en sus componentes.

La refrigeración también juega un papel fundamental en la licuefacción de gases, proceso mediante el cual un gas se convierte en líquido para facilitar su almacenamiento y transporte. Para lograrlo, el gas se enfría y comprime hasta que sus partículas se agrupan y adquieren temporalmente un estado líquido. Entre los gases que se obtienen mediante este proceso se encuentran el helio, utilizado en globos; el oxígeno, empleado en aplicaciones médicas; y el nitrógeno y el argón, que se utilizan en la industria del acero, entre otros.

En este contexto, ¿te imaginas cuántos refrigeradores, aires acondicionados, empresas de licuefacción de gases, camiones refrigerados y *chillers* existen en el mundo? Y eso sin considerar muchos otros ejemplos que dependen de la refrigeración. En efecto, ¡son muchísimos!

A lo largo de la historia, la humanidad ha buscado diversas formas de refrigeración para conservar alimentos y refrescar espacios. En tiempos antiguos, era común construir cuartos subterráneos y almacenar hielo traído desde las montañas. Estas técnicas se difundieron entre distintas culturas gracias a los viajeros que compartieron sus métodos de refrigeración en diferentes regiones.

De acuerdo con Miss y colaboradores (2024), no fue sino hasta 1824 cuando el ingeniero francés Sadi Carnot sentó las bases de la termodinámica con su obra titulada *Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego y sobre las máquinas adecuadas para desarrollar esta potencia*, en la que formuló principios fundamentales de esta ciencia. Posteriormente, en 1902, el inventor estadounidense Willis Carrier desarrolló las bases de la refrigeración moderna. Al aplicar esta tecnología en espacios habitados, observó cambios en la humedad relativa del aire enfriado, lo que lo llevó a desarrollar el concepto de climatización de verano.

En 1906 se patentó en Estados Unidos el primer equipo de aire acondicionado, vendido en 1907 a una fábrica en Japón, marcando el inicio de su expansión en instalaciones industriales y, veinte años más tarde, en los hogares. Para 1908 surgió la primera máquina que utilizaba agua como fluido refrigerante y, en 1911, General Electric inició la producción de la primera máquina frigorífica doméstica, llamada *Audiffren*.

Actualmente, muchos sistemas de refrigeración funcionan mediante la compresión y expansión de gases. Los fluidos refrigerantes empleados en estos sistemas incluyen compuestos como los hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC), clorofluorocarbonos (CFC), hidroclorofluorocarbonos (HCFC), todos con un Potencial de Calentamiento Global (PCG) miles de veces superior al del dióxido de carbono (CO_2).

Desafortunadamente, cuando estos compuestos son liberados a la atmósfera en grandes cantidades, la concentración de ozono (O_3) se ve afectada, disminuyendo su capacidad de absorber la radiación UV emitida por el sol. En consecuencia,

se producen efectos secundarios nocivos para nuestro planeta, como el deshielo de los polos, el calentamiento global y alteraciones en la intensidad y frecuencia de fenómenos climáticos como El Niño, entre muchos otros.

Ante esta problemática, actualmente se están buscando alternativas para reemplazar estos gases por opciones más ecológicas o incluso tecnologías alternativas, como la refrigeración magnética.

Refrigeración magnética y el efecto magnetocalórico

El átomo es la unidad mínima que forma todo lo que existe en el universo; es decir, todo lo que nos rodea —desde un pequeño alfiler, la ropa que usamos, los alimentos que consumimos hasta un cohe- te espacial— está compuesto de átomos.

Hay distintos tipos de átomos, cuya diferencia entre ellos radica en la cantidad de protones y neutrones en el núcleo, así como en el número de electrones que orbitan a su alrededor. Todos los elementos químicos conocidos están representados en la tabla periódica y, hasta la fecha, se han identificado 118 elementos. Algunos de ellos han sido sintetizados en laboratorios y registrados, aunque no tienen aplicaciones comerciales debido a la complejidad de su producción.

El magnetismo en los materiales surge a partir de la estructura atómica, en particular de las propiedades de los electrones. Estos generan dos contribuciones: el momento magnético asociado a su giro intrínseco, conocido como espín, y el momento magnético derivado de su movimiento orbital alrededor del núcleo. Según cómo se alineen estos momentos magnéticos, los materiales pueden ser magnéticos o no magnéticos.

Para aplicaciones domésticas, como refrigeradores y sistemas de aire acondicionado esta debe estar cerca de la temperatura ambiente; mientras que, para procesos industriales, como la licuefacción de gases, debe aproximarse a la temperatura de condensación del gas correspondiente.

El espín es una propiedad cuántica que describe el giro intrínseco de los electrones, como si fueran pequeños trompos que giran en dos direcciones posibles: "arriba" o "abajo". Esta propiedad no sólo es fundamental para entender el magnetismo, sino que también determina cómo los electrones interactúan entre sí y con los campos magnéticos externos, definiendo las propiedades magnéticas de los materiales.

Entre estos materiales, algunos poseen propiedades magnéticas especiales y presentan un fenómeno conocido como efecto magnetocalórico (EMC), que constituye la base de la refrigeración magnética. Esta tecnología ofrece una alternativa ecológica a los métodos de refrigeración convencionales. Cuando se aplica un campo magnético a estos materiales, los momentos magnéticos atómicos, que son el resultado de la combinación del movimiento orbital y del espín de los electrones, tienden a alinearse con la dirección del campo, magnetizando el material. El grado de magnetización depende de la organización de los momentos magnéticos en el material antes y después de aplicar el campo magnético.

En la figura 1 se puede observar el ciclo de refrigeración magnética. El material magnetocalórico se calienta cuando se aplica un campo magnético y, asombrosamente, se enfría cuando este campo se retira, un fenómeno llamado desmagnetización adiabática. Este proceso permite que los materiales magnetocalóricos funcionen como el núcleo de los sistemas de refrigeración magnética en intercambiadores de calor.

Estos materiales experimentan una transición del estado ferromagnético al estado paramagnético alrededor de la

temperatura de Curie (el punto crítico en el que un material magnético pierde su magnetización espontánea debido a la energía térmica). Es decir, por debajo de esta temperatura, los momentos magnéticos de los átomos permanecen alineados y forman un estado magnético ordenado, denominado ferromagnético; al superarla, el material se comporta como paramagnético.

En el caso de materiales magnetocalóricos, la temperatura de Curie define su temperatura de operación. Para aplicaciones domésticas, como refrigeradores y sistemas de aire acondicionado esta debe estar cerca de la temperatura ambiente; mientras que, para procesos industriales, como la licuefacción de gases, debe aproximarse a la temperatura de condensación del gas correspondiente.

Se han evaluado diversos materiales para refrigeración magnética, entre los que destacan aleaciones Heusler, el gadolinio y sus compuestos (Gong et al., 2024), así como las manganitas de lantano (Salazar-Muñoz et al., 2022). Las investigaciones en este campo buscan identificar materiales magnetocalóricos ideales: químicamente estables, económicos, fáciles de obtener y producir, abundantes en la corteza terrestre y, sobre todo, capaces de funcionar con campos magnéticos de baja intensidad.

Un ejemplo destacado es el gadolinio y sus aleaciones, conocidas por sus potentes propiedades magnetocalóricas. Sin embargo, requieren un campo magnético de unos 5 tesla (T), una intensidad difícil de alcanzar en aplicaciones comerciales. En contraste, nuestra investigación se centra en las manganitas de lantano, materiales que operan con campos magnéticos de entre 0.1 T y 1 T, lo que facilita su aplicación en sistemas prácticos, aunque aún no igualan la potencia del gadolinio.

Actualmente exploramos estrategias para mejorar su rendimiento ajustando su composición química, lo cual permite afinar las interacciones electrónicas y magnéticas entre átomos a través de un proceso conocido como doble intercambio. En una de nuestras publicaciones revisamos distintas manganitas de lantano y mostramos cómo estos ajustes en su composición pueden influir en sus propiedades magnetocalóricas.

Tecnologías de refrigeración alternativas

La refrigeración magnética no es la única alternativa ecológica a los sistemas convencionales de enfriamiento. La innovación tecnológica ha permitido desarrollar métodos más eficientes y amigables con el medio ambiente, capaces de satisfacer distintas necesidades. En la revisión realizada por S. A. Tassou y colaboradores (2010) se presentaron las siguientes tecnologías:

- La refrigeración por sorción, que emplea materiales especiales capaces de absorber o adsorber refrigerantes, generando un efecto de enfriamiento sin necesidad de electricidad, lo que la convierte en una opción ideal para zonas remotas.
- Los sistemas de absorción, que utilizan el calor como fuente de energía en lugar de compresores mecánicos tradicionales y emplean líquidos absorbentes, como agua y amoníaco, dentro de un ciclo térmico cerrado.
- La refrigeración por eyector, que reemplaza los compresores por inyector y aprovecha la dinámica de fluidos para mover el refrigerante. Este sistema es viable en instalaciones industriales que cuentan con calor residual.
- La refrigeración por ciclo de aire, ampliamente utilizada en el ámbito de la aviación, que emplea aire comprimido y expandido para controlar la

temperatura de las cabinas de manera eficiente y segura.

Algunas tecnologías más avanzadas incluyen la refrigeración termoeléctrica, basada en el efecto Peltier, fenómeno por el cual, el paso de una corriente eléctrica a través de la unión de dos materiales diferentes provoca la absorción de calor en un lado de la unión y su liberación en el otro. Esta tecnología no requiere piezas móviles y constituye una opción silenciosa para equipos electrónicos.

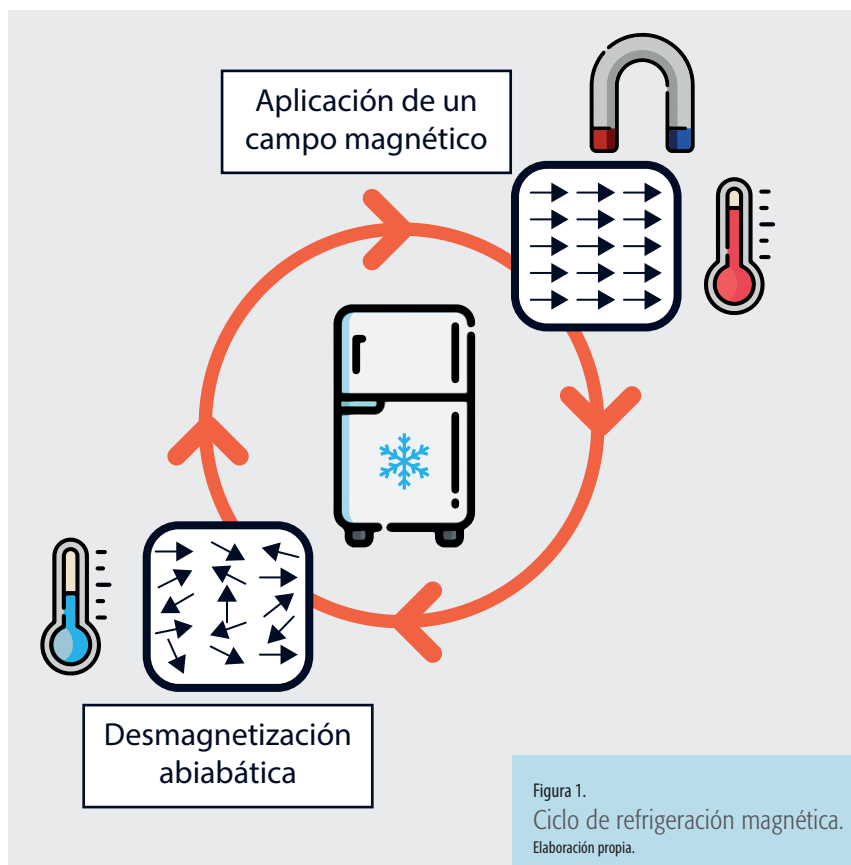
Asimismo, los sistemas termoacústicos emplean ondas de sonido para enfriar gases. Se trata de una tecnología muy ecológica, ya que no requiere de refrigerantes convencionales.

Finalmente, para aplicaciones que demandan enfriamiento extremo, se utiliza el ciclo Stirling, que comprime y expande gases, como el helio, para alcanzar temperaturas ultra bajas. Esta tecnología tiene aplicaciones útiles en la investigación científica y la criogenia.

Estos métodos representan avances significativos hacia una refrigeración más sostenible y adaptable a una gran variedad de necesidades, desde aplicaciones domésticas hasta procesos industriales e investigación avanzada.

Conclusiones

La refrigeración magnética es una alternativa ecológica con un gran potencial para reemplazar las tecnologías de refrigeración convencionales, las cuales generan un impacto ambiental significativo debido al uso de gases de efecto invernadero. Basada en el efecto magnetocalórico, esta tecnología promete un enfriamiento más sostenible y eficiente. Sin embargo, su implementación a gran escala aún sigue en investigación, pues se





VERÓNICA ELVIRA SALAZAR MUÑOZ

Verónica Elvira Salazar Muñoz. Doctora en Ingeniería y Ciencias de Materiales por la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP). Actualmente se desempeña como profesor-asignatura con actividades de investigación en la Facultad de Ingeniería de la UASLP. Trabaja en proyectos tales como: Refrigeración magnética y materiales magnetocalóricos. Investigación en materiales magnéticos avanzados y Ferritas tipo M modificadas con tierras raras. Desarrollo de inhibidores de corrosión de origen natural a partir de extractos de gobernadora (*Larrea tridentata*) para la protección de aceros en medios ácidos, entre otros.

requieren materiales magnetocalóricos que sean accesibles, económicos y efectivos al aplicar campos magnéticos bajos.

Por otro lado, actualmente se investigan otras tecnologías de refrigeración sostenibles, como los sistemas de sorción, absorción y termoeléctricos, que amplían el panorama de soluciones amigables con el medio ambiente. Estas innovaciones demuestran que es posible avanzar hacia métodos de enfriamiento que minimicen el impacto ambiental, satisfaciendo diversas necesidades en aplicaciones domésticas, industriales y científicas. La adopción de estas tecnologías

representa un paso importante hacia un futuro más sustentable en el manejo de la energía y la conservación de recursos.

Será necesaria una transición global en el uso de sistemas de refrigeración, similar a la que ocurrió con los televisores. Hoy en día, incluso en comunidades rurales, las pantallas planas han reemplazado casi por completo a los televisores analógicos. De manera semejante, los refrigeradores deberán evolucionar hacia tecnologías más ecológicas, una medida urgente para reducir la emisión de gases de efecto invernadero y mitigar el impacto ambiental sobre nuestro planeta. 

Referencias bibliográficas:

- Gong, Y., Miao, X., Qian, F., Xu, F., & Caron, L. (2024). A brief review of microstructure design in transition metal-based magnetocaloric materials. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 36(50), 503001. <https://doi.org/10.1088/1361-648X/ad7cb3>
- Miss, M. I. H., Sierra, J. C. O., Notario, G. E., Zárraga, F. R. L., & Martínez, F. O. (2024). Desarrollo de la refrigeración. *Brazilian Journal of Development*, 10(6), e70928. <https://doi.org/10.34117/bjdv10n6-087>
- Salazar-Muñoz, V. E., Lobo Guerrero, A., & Palomares-Sánchez, S. A. (2022). Review of magnetocaloric properties in lanthanum manganites. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 562, 169787. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2022.169787>
- Salazar-Muñoz, V. E., Palomares-Sánchez, S. A., Betancourt, I., et al. (2019). Synthesis and magnetocaloric properties of $\text{La}_{0.67}\text{Ca}_{0.29}\text{Sr}_{0.04}\text{MnO}_3$ obtained from modified sol-gel Pechini method. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 90, 241–249. <https://doi.org/10.1007/s10971-019-04950-3>
- Tassou, S. A., Lewis, J. S., Ge, Y. T., Hadawey, A., & Chaer, I. (2010). A review of emerging technologies for food refrigeration applications. *Applied Thermal Engineering*, 30(4), 263–276. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2009.09.001>

