

Refrigeración magnética: enfriar sin contaminar

Ana María Bolarín-Miró, Cristhian Antonio Taboada-Moreno y Félix Sánchez-De Jesús *

Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Pachuca, Hidalgo, México

* Autor de correspondencia: fsanchez@uaeh.edu.mx; Tel.: +527717172000

Artículo de divulgación científica

Recibido: 28 de mayo de 2025 Aceptado: 28 de junio de 2025 Publicado: 2 de julio de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i1.461>

Resumen: En este artículo se analiza la refrigeración magnética, como una alternativa ecológica a la refrigeración convencional. Esta tecnología se basa en el efecto magnetocalórico, una propiedad de ciertos materiales para cambiar su temperatura mediante la aplicación y remoción de campos magnéticos y que permite enfriar sin utilizar gases contaminantes, presentándose como una alternativa ecológica y eficiente a la refrigeración convencional. Se abordan los dos tipos principales de materiales magnetocalóricos: metálicos y cerámicos, describiendo sus características, diferencias y ventajas. Se incluye una revisión actualizada del estado del arte, apoyada en estudios recientes que analizan tanto materiales avanzados como técnicas para su obtención. Además, se explican los parámetros fundamentales del efecto magnetocalórico, como el cambio de entropía magnética y la capacidad de enfriamiento, con ejemplos de cálculos sencillos para facilitar su comprensión. Las aplicaciones en dispositivos de refrigeración doméstica, industrial y médica se discuten para resaltar el impacto potencial de esta tecnología. Finalmente, se concluye que el desarrollo y la implementación de materiales magnetocalóricos ofrecen una vía prometedora para reducir el consumo energético y la contaminación ambiental asociada con los sistemas tradicionales, fomentando un futuro más sostenible.

Palabras clave: refrigeración magnética; refrigeración ecológica; efecto magnetocalórico; magnetismo.

Introducción

En una sociedad cada vez más consciente de la importancia de cuidar el medio ambiente, la manera en que se refrigeran espacios habitacionales, alimentos, medicamentos y equipos tecnológicos se vuelve un tema de vital relevancia, especialmente estos últimos, cada vez más requerido para las actividades diarias y especialmente con el uso de sistemas informáticos que brindan herramientas de inteligencia artificial, los cuales requieren sistemas de refrigeración robustos y permanentes. En muchos sistemas de refrigeración convencionales, como los refrigeradores o los aires acondicionados que se usan en casas o en la industria, se utilizan ampliamente gases de tercera generación llamados hidrofluorocarbonos (HFC) que a pesar de ser menos contaminantes que sus predecesores, todavía tienen un alto potencial de contribuir al calentamiento global. Por tal motivo, estos gases están siendo reemplazados gradualmente por gases de cuarta generación denominados Hidrofluoroolefinas (HFO). Los HFO, aunque son más amigables con el medio ambiente, siguen siendo objeto de estudio debido a inconvenientes relacionados con sus propiedades físico-químicas tales como: los productos de degradación, la toxicidad, la inflamabilidad la estabilidad térmica y el mecanismo de descomposición (Zhang et. al., 2024, Bolarín et al., 2024). Además, su producción y uso consumen grandes cantidades de energía eléctrica, a menudo proveniente de fuentes no renovables, contribuyendo negativamente al ecosistema. Por esta razón, científicos e ingenieros buscan alternativas más limpias y eficientes que puedan sustituir estas tecnologías tradicionales y reducir el daño ambiental. Una de las alternativas más innovadoras y prometedoras es la refrigeración magnética, que se basa en un fenómeno físico, denominado efecto magnetocalórico, descubierto hace más de un siglo pero que ha cobrado interés real en las últimas décadas, y que se analizará en los siguientes párrafos.

Desarrollo

Estado del Arte

Durante muchos años, el gadolinio y sus aleaciones han sido los materiales magnetocalóricos más importantes para estudiar y aprovechar su intensa respuesta magnetocalórica cercana a la temperatura ambiente. Sin embargo, el alto costo y la limitada disponibilidad de estos elementos por ser del grupo de las tierras raras (materiales estratégicos), (Morales et al., 2024) han motivado la búsqueda de otras opciones más accesibles y sostenibles.

Actualmente, las investigaciones se han diversificado mucho, explorando dos grandes familias: los materiales metálicos y los cerámicos o inorgánicos. Los materiales metálicos, como algunas aleaciones basadas en manganeso, hierro y silicio, han mostrado un gran potencial porque sus propiedades pueden ser controladas mediante cambios en la composición química o tratamientos térmicos especiales. Por ejemplo, aleaciones como $\text{MnFe}(\text{P}, \text{Si})$ o $\text{La}(\text{Fe}, \text{Si})_{13}$ tienen transiciones o cambios en comportamientos magnéticos muy importantes, que incrementan el efecto magnetocalórico (Ghorai *et al.*, 2024). Por otro lado, los materiales cerámicos, tipo óxidos metálicos, como los óxidos de hierro o ferritas y los óxidos de manganeso o manganitas, con una organización de sus átomos en una estructura tipo perovskita, ofrecen ventajas en estabilidad química y bajo costo, aunque generalmente muestran un efecto magnetocalórico más moderado que la presentada por los materiales metálicos. En el afán de mejorar sus propiedades, los científicos continúan explorando nuevos caminos, como el caso de los materiales compósitos, formados por la combinación de varios materiales, donde combinan características de ambos, y podrían abrir nuevas posibilidades para incrementar su eficiencia (Taboada *et al.*, 2023).

En los últimos años, el avance tecnológico de los sistemas de control e informáticos ha acelerado la investigación en este campo. Herramientas de inteligencia artificial ayudan a predecir qué combinaciones de materiales pueden funcionar mejor, reduciendo tiempo y costos en laboratorio. Investigaciones recientes han logrado mejoras significativas en la eficiencia del efecto magnetocalórico, acercando estos materiales hacia aplicaciones comerciales (Law *et al.*, 2023; Yuan *et al.*, 2024).

Características

El efecto magnetocalórico, mostrado en la Figura 1, consiste en que ciertos materiales pueden calentarse o enfriarse al ser expuestos a ciclos de magnetización-desmagnetización, sin necesidad de usar gases refrigerantes. Tal como se observa en la Figura 1, cuando un material no está bajo la influencia de un campo magnético externo (B), tiene sus espines electrónicos o momentos magnéticos de espín posicionados al azar (Figura 1a), pero al aplicar un campo magnético sobre un material magnetocalórico, los momentos magnéticos en el material se ordenan en la misma dirección que el campo magnético externo aplicado (Figura 1b), liberando calor y aumentando la temperatura (Taboada *et al.*, 2020). Al retirar el campo, estos momentos se desordenan, absorbiendo calor y enfriando el material.

El efecto que ejerce un campo magnético externo (B) sobre algunos materiales específicos, hace posible el diseño de un ciclo de refrigeración magnética, mostrado esquemáticamente en la Figura 2, por el cual al aplicar un campo magnético se generan una liberación de calor ($+Q$), aumentando la temperatura, mientras que, al retirar el campo, el material absorbe energía calorífica o calor del material, enfriándolo ($-Q$). Por lo tanto, la refrigeración magnética se basa en aplicar ciclos de magnetización-desmagnetización (calentamiento-enfriamiento) a un material magnetocalórico que se encuentra en contacto con un fluido, propiciando un intercambio de energía entre ambos.

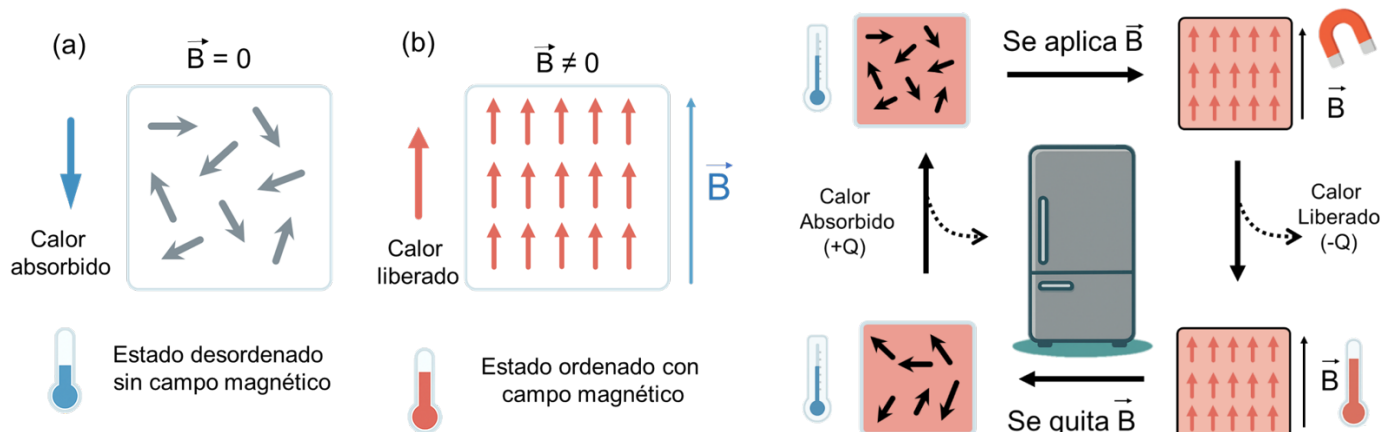


Figura 1: Reorientación de los espines a causa del efecto magnetocalórico: (a) sin la aplicación de campo magnético externo ($B=0$) los espines del material están ordenados aleatoriamente y desordenado, (b) al aplicar un campo externo ($B \neq 0$) se orientan sus espines en la dirección del campo, liberando calor.

Figura 2: Esquema ilustrativo del ciclo de refrigeración basado en el efecto magnetocalórico, donde se aprecia la alineación y desalineación de los momentos magnéticos y el cambio de temperatura asociado.

Para comprender mejor cómo funcionan estos materiales y poder aplicarlos para sistemas de refrigeración, es útil conocer los dos parámetros más importantes que describen el efecto magnetocalórico, mostrados gráficamente en la Figura 3. El primero es el cambio de entropía magnética (ΔS_M), es una propiedad asociada al cambio de orden-desorden de los momentos magnéticos, la cual indica la cantidad de calor que el material puede intercambiar debido a la reorganización de sus momentos magnéticos. El segundo es la capacidad de refrigeración (RC), entendida como la capacidad para absorber o ceder energía calorífica de los materiales, y que se mide matemáticamente como el área bajo la curva del cambio de entropía frente a la temperatura. Estos parámetros se determinan mediante experimentos donde se mide la magnetización del material a diferentes temperaturas y campos magnéticos. Cabe mencionar que, en la actualidad, la simulación computacional también permite estimar estos valores con gran precisión (Zhang *et al.*, 2023; Liu *et al.*, 2024).

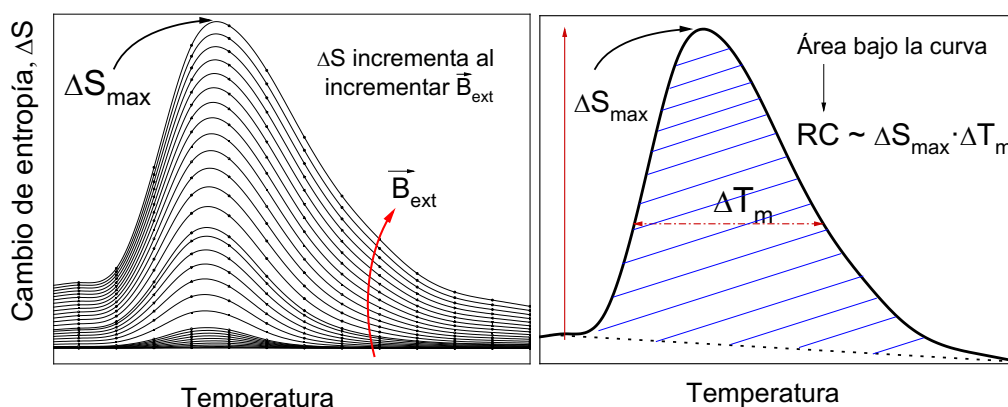


Figura 3: Curvas características de cambio de entropía magnética (ΔS_M) y la determinación de la capacidad de refrigeración (RC), frente a la temperatura y el campo magnético aplicado para un material magnetocalórico.

Aplicaciones

La refrigeración magnetocalórica promete revolucionar varios sectores. En el hogar, podría reemplazar a los refrigeradores tradicionales, eliminando la necesidad de gases contaminantes y reduciendo el consumo eléctrico (Bolarín *et al.*, 2020). En la industria, los sistemas de enfriamiento basados en este fenómeno serían más silenciosos, duraderos y menos propensos a fugas de refrigerantes. Además, en la medicina, la refrigeración portátil para transporte de vacunas o medicamentos sensibles podría beneficiarse enormemente de esta tecnología, además del uso de materiales que presentan el efecto magnetocalóricos en un rango estrecho de temperatura cercana a la temperatura corporal, en el tratamiento de cáncer a través de la metodología denominada hipertermia, que ya es una realidad.

Conclusiones

La tecnología de refrigeración basada en materiales magnetocalóricos representa una opción limpia, eficiente y prometedora para sustituir los sistemas convencionales que han demostrado ser dañinos para el planeta. Aunque todavía enfrenta retos, como la optimización del desempeño de los materiales, reducción de costos y desarrollo de sistemas comerciales, el avance científico es muy alentador. La colaboración interdisciplinaria, desde la física y química hasta la ingeniería y la computación, está acelerando la llegada de esta tecnología al mercado. Su aplicación masiva en los diferentes sectores podría contribuir significativamente a mitigar el cambio climático, reducir la dependencia de combustibles fósiles y promover un futuro más sostenible para las próximas generaciones.

Agradecimientos y financiamiento: Los autores agradecen el apoyo financiero de la Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) bajo el proyecto CF-2023-I-769.

Bibliografía

Xinxin Zhang , Yingzhen Li (2024). A review of recent research on hydrofluoroolefin (HFO) and hydrochlorofluoroolefin (HCFO) refrigerants. *Energy*, 311, 133423. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133423>

- Bolarín-Miró, A. M., Taboada-Moreno, C. A., & Cortés-Escobedo, C. A. (2024). Tuning the magnetocaloric properties of lanthanum-strontium manganite by rare-earth Nd³⁺ doping. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 149, 12665–12674. <https://doi.org/10.1007/s10973-024-13565-y>
- Bolarín-Miró, A. M., Taboada-Moreno, C. A., Cortés-Escobedo, C. A., Rosales-González, O., Torres-Villaseñor, G., & Sánchez-De Jesús, F. (2020). Effect of high-energy ball milling on magnetocaloric properties of La_{0.7}Ca_{0.2}Sr_{0.1}MnO₃. *Applied Physics A*, 126, 369. <https://doi.org/10.1007/s00339-020-03555-w>
- Ghorai, S., Okamoto, S., Matsuda, T., Taniyama, T., & Kindo, K. (2024). Giant magnetocaloric effect in the (Mn,Fe)NiSi-system. *Physical Review Materials*, 8(12), 124401. <https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.8.124401>
- Law, J. Y., Yeo, S. J., Goh, S. H., Sivarajan, R., & Omar, M. H. (2023). Current perspective in magnetocaloric materials research. *Journal of Applied Physics*, 133(4), 040903. <https://doi.org/10.1063/5.0130035>
- Liu, W., Zhang, Y., Wang, J., & Chen, H. (2024). A matter of performance & criticality: a review of rare-earth-based magnetocaloric intermetallic compounds for hydrogen liquefaction. *arXiv preprint*. <https://arxiv.org/abs/2405.01128>
- Morales Álvarez, F., Gómez, A., & Pérez, L. (2023). Magnetocaloric effect of nanostructured La_{0.6}Sr_{0.4}CoO₃. *arXiv preprint*. <https://arxiv.org/abs/2310.05722>
- Taboada-Moreno, C. A., Bolarín-Miró, A. M., Pedro-García, F., Cortés-Escobedo, C. A., & Sánchez-De Jesús, F. (2023). Role of Gd³⁺ on the magnetocaloric properties of lanthanum-strontium manganite. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 570, 170542. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2023.170542>
- Taboada-Moreno, C. A., Sánchez-De Jesús, F., Pedro-García, F., Cortés-Escobedo, C. A., Betancourt-Cantera, J. A., Ramírez-Cardona, M., & Bolarín-Miró, A. M. (2020). Large magnetocaloric effect near room temperature in Sr²⁺ doped La_{0.7}Ca_{0.3}MnO₃. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 496, 165887. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.165887>
- Yuan, J., Li, X., Wang, Y., Zhang, X., & Liu, H. (2024). Enhancing magnetocaloric material discovery: A machine learning approach using an autogenerated database. *AIP Advances*, 14(8), 085125. <https://doi.org/10.1063/5.0206855>
- Zhang, Z., Chen, Q., Li, L., Wang, R., & Zhao, Y. (2023). Structural, magnetic and magnetocaloric properties in distorted RE₂NiTiO₆ double perovskite compounds. *Journal of Physics: Energy*, 5(1), 014017. <https://doi.org/10.1088/2515-7655/acb176>
- Zheng, S.-H., Li, J., Wang, X., & Chen, Y. (2023). Excellent magnetocaloric performance of Fe₇Ce₁₃B₉ metallic glasses. *Materials*, 16(12), 4393. <https://doi.org/10.3390/ma16124393>