

Refrigeración Magnética: Fundamentos Termodinámicos, Avances en Materiales y Hoja de Ruta hacia la Comercialización

1. Introducción a la Refrigeración de Estado Sólido

1.1. El Paradigma de la Refrigeración por Compresión de Vapor y sus Limitaciones

Durante más de un siglo, la tecnología de refrigeración por compresión de vapor ha sido el pilar fundamental de la industria del frío, desde aplicaciones domésticas hasta sistemas industriales a gran escala. Su principio de funcionamiento, basado en el ciclo termodinámico de un fluido refrigerante que experimenta cambios de fase entre líquido y gas, ha sido objeto de una optimización continua, alcanzando niveles de eficiencia muy elevados.¹ Sin embargo, este paradigma tecnológico se enfrenta a limitaciones intrínsecas y a una creciente presión regulatoria y medioambiental que impulsan la búsqueda de alternativas disruptivas.

El principal inconveniente de la refrigeración por compresión de vapor reside en la naturaleza de sus fluidos de trabajo. Históricamente, se han utilizado clorofluorocarbonos (CFCs) e hidroclorofluorocarbonos (HCFCs), y más recientemente hidrofluorocarbonos (HFCs). Estas sustancias, si bien son eficaces como refrigerantes, tienen un impacto ambiental devastador. Los CFCs y HCFCs son potentes agentes de agotamiento de la capa de ozono, mientras que los HFCs, aunque no afectan a la capa de ozono, poseen un Potencial de Calentamiento Global (GWP, por sus siglas en inglés) miles de veces superior al del dióxido de carbono.³ La fuga de estos gases a la atmósfera, inevitable en el ciclo de vida de los equipos, contribuye significativamente al cambio climático.

En respuesta a esta amenaza, se han establecido marcos regulatorios internacionales y nacionales cada vez más estrictos. Acuerdos como el Protocolo de Montreal y la Enmienda de Kigali, junto con normativas como la Regulación F-Gas de la Unión Europea, imponen una eliminación progresiva de los refrigerantes de alto GWP, forzando a la industria a buscar alternativas más sostenibles.³ Si bien se están desarrollando refrigerantes de bajo GWP, como las hidrofluoroolefinas (HFOs) o refrigerantes naturales como el amoníaco y el CO₂, estos a

menudo presentan sus propios desafíos en términos de inflamabilidad, toxicidad o presiones de trabajo elevadas.⁵

Además de la problemática medioambiental, los sistemas de compresión de vapor presentan desventajas operativas inherentes. El componente central, el compresor mecánico, es una fuente significativa de ruido y vibraciones, lo que puede ser indeseable en entornos domésticos o sensibles como los hospitales. Al ser una pieza móvil sometida a un trabajo intensivo, el compresor también es el principal punto de fallo, lo que implica costes de mantenimiento y una vida útil limitada del equipo.⁷

1.2. La Refrigeración Magnética como Alternativa Disruptiva

En este contexto, la refrigeración magnética emerge como una tecnología de estado sólido que representa un cambio de paradigma fundamental. En lugar de depender de la compresión y expansión de un gas, esta tecnología aprovecha una propiedad intrínseca de ciertos materiales sólidos: el **efecto magnetocalórico (MCE)**.⁴ Este efecto describe el cambio de temperatura reversible que experimenta un material magnético cuando se le somete a un campo magnético variable.¹¹

La principal ventaja de la refrigeración magnética es su carácter intrínsecamente sostenible. Al utilizar un refrigerante sólido, elimina por completo la necesidad de gases fluorados, lo que se traduce en un GWP y un Potencial de Agotamiento del Ozono (ODP) directos nulos.⁸ Además, al prescindir del compresor mecánico, los sistemas de refrigeración magnética son notablemente más silenciosos, presentan menos vibraciones y tienen un potencial de fiabilidad y vida útil superior debido a la reducción de piezas móviles sujetas a desgaste.⁷

Desde el punto de vista de la eficiencia, la refrigeración magnética ofrece un potencial significativo. Los modelos teóricos y los prototipos experimentales sugieren que esta tecnología puede ser entre un 20% y un 30% más eficiente energéticamente que los sistemas de compresión de vapor más avanzados, que ya operan cerca de sus límites termodinámicos.³ Esta mejora en la eficiencia no solo reduciría los costes operativos, sino que también disminuiría el consumo global de energía, con los consiguientes beneficios medioambientales indirectos.

Aunque el MCE fue descubierto por el físico alemán Emil Warburg en 1881, la tecnología ha permanecido en gran medida en el ámbito del laboratorio, principalmente para aplicaciones criogénicas. No ha sido hasta las últimas dos décadas que la refrigeración magnética a temperatura ambiente ha ganado viabilidad comercial. Este resurgimiento se debe a dos avances cruciales: el descubrimiento de materiales con un "efecto magnetocalórico gigante" y el desarrollo de imanes permanentes de alto campo más asequibles y potentes.¹

La transición de una tecnología basada en la termodinámica de fluidos a una basada en la física del estado sólido no es una simple mejora incremental, sino una redefinición de los fundamentos de la refrigeración. Este cambio desplaza el foco de los desafíos de ingeniería

desde la mecánica de fluidos y la contención de gases a alta presión hacia la ciencia de materiales avanzada y la ingeniería electromagnética. El éxito y la adopción generalizada de la refrigeración magnética dependerán, por tanto, de la capacidad para diseñar, sintetizar y fabricar a gran escala materiales magnetocalóricos con propiedades optimizadas y de integrar estos materiales en sistemas de refrigeración eficientes y económicamente competitivos.

2. Principios Físicos del Efecto Magnetocalórico (MCE)

2.1. Termodinámica de los Materiales Magnéticos

El efecto magnetocalórico es un fenómeno intrínseco de los materiales magnéticos, especialmente pronunciado en materiales paramagnéticos y ferromagnéticos cerca de su temperatura de transición magnética (temperatura de Curie).⁴ Su origen reside en el acoplamiento entre los grados de libertad magnéticos (espines de los electrones) y los grados de libertad de la red cristalina (vibraciones o fonones) de un material.

La entropía total de un sólido magnético, S , puede considerarse como la suma de la entropía magnética (S_m), la entropía de la red (S_{lat}) y la entropía electrónica (S_{el}). En el MCE, el campo magnético externo actúa directamente sobre la entropía magnética. En ausencia de un campo magnético y por encima de la temperatura de Curie, los momentos magnéticos de los átomos (espines) están orientados al azar, lo que corresponde a un estado de alta entropía magnética. Cuando se aplica un campo magnético externo (H), este ejerce un par de torsión sobre los momentos magnéticos, tendiendo a alinearlos con la dirección del campo. Este proceso aumenta el orden magnético del sistema, lo que se traduce en una disminución de la entropía magnética (S_m).¹¹

Según la segunda ley de la termodinámica, en un proceso adiabático (es decir, sin intercambio de calor con el entorno), la entropía total del sistema debe permanecer constante. Por lo tanto, la disminución de la entropía magnética debe ser compensada por un aumento en las otras contribuciones a la entropía, principalmente la de la red. Un aumento de la entropía de la red se manifiesta como un incremento de las vibraciones atómicas, lo que macroscópicamente se percibe como un calentamiento del material.¹¹

El proceso inverso ocurre al retirar el campo magnético. La agitación térmica del material hace que los momentos magnéticos vuelvan a un estado desordenado, aumentando la entropía magnética. De nuevo, para mantener la entropía total constante en un proceso adiabático, este aumento en S_m se compensa con una disminución de la entropía de la red, lo que provoca el enfriamiento del material por debajo de su temperatura inicial.⁷ Este calentamiento y enfriamiento reversible al aplicar y retirar un campo magnético es la esencia del efecto magnetocalórico.

2.2. El Ciclo de Refrigeración Magnético Básico (Análogo al Ciclo de Carnot)

El MCE puede ser explotado en un ciclo termodinámico para bombear calor, de forma análoga al ciclo de Carnot de la refrigeración por compresión de vapor. En lugar de compresión y expansión de un gas, el ciclo magnético utiliza la magnetización y desmagnetización de un material sólido.¹¹ El ciclo básico consta de cuatro pasos:

1. **Magnetización Adiabática:** El material magnetocalórico (MCM), inicialmente a una temperatura $T_{fría}$ y térmicamente aislado, se introduce en un campo magnético. La alineación de los espines reduce la entropía magnética, y para conservar la entropía total, el material se calienta hasta una temperatura $T_{caliente}$.¹¹
2. **Transferencia de Calor Isomagnética:** Manteniendo el campo magnético constante, el material se pone en contacto térmico con un sumidero de calor (por ejemplo, el ambiente). Como el material está a una temperatura superior a la del sumidero ($T_{caliente}$), cede calor (QH) al entorno, enfriándose hasta la temperatura del sumidero pero manteniendo el orden magnético.¹⁵
3. **Desmagnetización Adiabática:** El material se aísla térmicamente de nuevo y se retira del campo magnético. Los espines se desordenan, aumentando la entropía magnética. Para mantener la entropía total constante, el material se enfría hasta una temperatura inferior a la inicial, $T_{fría}$.¹¹
4. **Transferencia de Calor Isomagnética:** Manteniendo el campo magnético bajo o nulo, el material, ahora más frío que el espacio a refrigerar, se pone en contacto térmico con este. Absorbe calor (QC) del espacio refrigerado, volviendo a su estado de temperatura y entropía inicial, completando así el ciclo.¹⁵

2.3. El Ciclo de Regenerador Magnético Activo (AMR): La Clave para la Viabilidad

Aunque conceptualmente elegante, el ciclo básico tiene una limitación práctica fundamental: el cambio de temperatura adiabático (ΔT_{ad}) de los mejores materiales magnetocalóricos a temperatura ambiente es de solo unos 2-4 K por Tesla de campo magnético aplicado.¹⁸ Esto es insuficiente para la mayoría de las aplicaciones de refrigeración, que requieren un rango de temperatura (

ΔT_{span}) de 20 K o más. Construir una cascada de múltiples etapas para alcanzar este rango sería complejo e ineficiente debido a las pérdidas de transferencia de calor entre etapas.¹⁹

La solución a este problema es el ciclo de **Regenerador Magnético Activo (AMR)**, un concepto

que revolucionó la refrigeración magnética y la hizo viable para aplicaciones prácticas.¹⁷ En un sistema AMR, el material magnetocalórico no es un bloque monolítico, sino que conforma una matriz porosa (por ejemplo, un lecho de esferas o un conjunto de placas paralelas) que actúa simultáneamente como refrigerante y como regenerador de calor.²⁰ Un fluido de transferencia de calor (como una mezcla de agua y alcohol) es bombeado de forma oscilante a través de esta matriz, en sincronía con el ciclado del campo magnético.²¹

El ciclo AMR consta de cuatro procesos, aunque su dinámica es más compleja:

1. **Magnetización:** Se aplica el campo magnético al lecho regenerador, lo que calienta el MCM en toda su longitud debido al MCE.
2. **Flujo Caliente (Cold Blow to Hot Blow):** El fluido de transferencia de calor se bombea desde el extremo frío del regenerador hacia el extremo caliente. A medida que fluye, absorbe el calor liberado por el MCM durante la magnetización, saliendo del extremo caliente a una temperatura superior a la del sumidero de calor. Este calor se cede al ambiente en un intercambiador de calor externo.²⁰
3. **Desmagnetización:** Se retira el campo magnético, lo que enfría el MCM en toda su longitud.
4. **Flujo Frío (Hot Blow to Cold Blow):** El fluido se bombea en la dirección opuesta, desde el extremo caliente hacia el frío. Al pasar por el lecho ahora frío, el fluido cede su calor al MCM, enfriándose progresivamente. Sale por el extremo frío a una temperatura inferior a la del espacio a refrigerar, donde absorbe calor de la carga de refrigeración en un segundo intercambiador de calor.²⁰

Este proceso cíclico establece y mantiene un gradiente de temperatura estable a lo largo del lecho del regenerador. Cada porción del MCM cicla a través de un pequeño rango de temperatura, pero el efecto acumulativo a lo largo de todo el regenerador permite alcanzar un ΔT_{span} entre los intercambiadores de calor caliente y frío que es mucho mayor que el ΔT_{ad} intrínseco del material.³

La implementación del ciclo AMR introduce una complejidad significativa. La eficiencia del sistema ya no depende únicamente de la magnitud del MCE del material, sino de una intrincada interacción de múltiples factores. La sincronización precisa entre el perfil temporal del campo magnético y el perfil de flujo del fluido es crucial; desajustes en esta sincronización pueden degradar drásticamente el rendimiento, ya que el fluido podría fluir mientras el campo magnético está cambiando en la dirección opuesta, interrumpiendo el gradiente de temperatura.²² Además, el diseño geométrico del regenerador (por ejemplo, el tamaño de las partículas o el espaciado de las placas) debe optimizarse para maximizar la transferencia de calor y minimizar la caída de presión del fluido, dos objetivos que a menudo están en conflicto.²³ Por lo tanto, el diseño de un refrigerador magnético eficiente es un problema multifísico que requiere la co-optimización del material, el sistema magnético y la ingeniería de fluidos y transferencia de calor.

3. Formalismo Matemático y Ecuaciones Gobernantes

La cuantificación del efecto magnetocalórico y el rendimiento de un ciclo de refrigeración magnética se basa en un sólido formalismo termodinámico que relaciona las propiedades magnéticas y térmicas de los materiales.

3.1. Entropía Total y la Relación de Maxwell

La base termodinámica del MCE se encuentra en la dependencia de la entropía total de un sólido magnético, S , de la temperatura (T) y del campo magnético aplicado (H). La entropía total es la suma de tres contribuciones principales: la entropía magnética (S_m), asociada al orden de los espines; la entropía de la red (S_{lat}), asociada a las vibraciones atómicas (fonones); y la entropía electrónica (S_{el}), asociada a los electrones de conducción.²⁴

$$S(T,H)=S_m(T,H)+S_{lat}(T)+S_{el}(T)$$

Mientras que S_{lat} y S_{el} dependen principalmente de la temperatura, S_m es una función tanto de la temperatura como del campo magnético. La herramienta matemática clave que conecta el mundo magnético con el térmico es una de las relaciones de Maxwell, que se deriva del potencial termodinámico de la energía libre de Gibbs 24:

$$(\partial H \partial S)_T = (\partial T \partial M)_H$$

Esta ecuación es fundamental porque establece que el cambio de entropía con el campo magnético a temperatura constante es igual al cambio de magnetización (M) con la temperatura a campo magnético constante. Esto permite calcular cambios de entropía, una cantidad no medible directamente, a partir de mediciones de magnetización, que son experimentalmente accesibles.

3.2. Cambio de Entropía Magnética Isotérmica (ΔS_m)

El cambio de entropía magnética isotérmica, ΔS_m , cuantifica la variación de la entropía del material cuando el campo magnético se modifica de un valor inicial H_0 a un valor final H_1 manteniendo la temperatura constante. Se obtiene integrando la relación de Maxwell ²⁴:

$$\Delta S_m(T, \Delta H) = \int_{H_0}^{H_1} (\partial T \partial M)_H dH$$

Para un material magnetocalórico, la magnetización disminuye al aumentar la temperatura, por lo que $(\partial T \partial M)_H$ es negativo. Por lo tanto, al aplicar un campo magnético ($H_1 > H_0$), el ΔS_m es negativo, lo que corresponde a la reducción de la entropía debido a la alineación de los espines.

Un valor absoluto grande de ΔS_m es una característica deseable en un material refrigerante, ya que está directamente relacionado con la cantidad de calor que puede ser intercambiado con el fluido de transferencia en un ciclo ideal.²⁵

3.3. Cambio de Temperatura Adiabático (ΔT_{ad})

El cambio de temperatura adiabático, ΔT_{ad} , es el cambio de temperatura que experimenta el material cuando el campo magnético se varía en condiciones de aislamiento térmico (entropía total constante). Se puede derivar de los principios termodinámicos y se expresa como ²⁴:

$$\Delta T_{ad}(T, \Delta H) = - \int_{H_0}^{H_1} \frac{1}{T} \left(\frac{\partial M(T, H)}{\partial T} \right)_H dH$$

Donde $C(T, H)$ es la capacidad calorífica específica del material a campo y temperatura constantes. Esta ecuación revela los requisitos para un material con un gran MCE: además de un gran cambio en la magnetización con la temperatura (un valor de $(\partial T / \partial M)_H$ grande y negativo), el material debe poseer una baja capacidad calorífica. Una capacidad calorífica baja significa que se necesita menos energía para cambiar la temperatura del material, lo que maximiza el calentamiento o enfriamiento para un cambio de entropía magnética dado.⁴

Estas ecuaciones demuestran la compleja interdependencia de las propiedades del material. La búsqueda de un refrigerante magnético superior no se limita a maximizar el cambio de magnetización cerca de la temperatura de Curie. Es un problema de optimización multifactorial que también debe considerar la capacidad calorífica para maximizar el ΔT_{ad} y, además, una alta conductividad térmica para facilitar una rápida transferencia de calor hacia y desde el fluido regenerador, permitiendo mayores frecuencias de ciclo.⁴

3.4. Capacidad de Refrigeración y Coeficiente de Rendimiento (COP)

Para evaluar la utilidad práctica de un material, se utilizan métricas de rendimiento que van más allá del pico de ΔS_m o ΔT_{ad} . Una de las más importantes es la **Capacidad de Refrigeración (RC)**, que cuantifica la cantidad de calor que puede ser transferida en un ciclo ideal entre las temperaturas del foco caliente (T_{hot}) y el foco frío (T_{cold}). Se calcula integrando la curva de cambio de entropía magnética sobre el rango de temperatura de trabajo ²⁵:

$$q = \int_{T_{cold}}^{T_{hot}} \Delta S_m(T) dT$$

Un material con una curva de ΔS_m que es no solo alta sino también ancha es preferible, ya que indica una alta capacidad de refrigeración sobre un rango de temperatura más amplio.

El rendimiento global de un refrigerador magnético se mide por su **Coeficiente de Rendimiento (COP)**, definido como la relación entre el calor extraído del espacio frío (QC) y el

trabajo neto (W) suministrado al sistema durante un ciclo ⁴:
 $COP=W_{QC}$

El trabajo en un ciclo magnético es principalmente el trabajo magnético realizado para ciclar el material dentro y fuera del campo magnético, además del trabajo de bombeo del fluido. Un COP alto indica una alta eficiencia, ya que se extrae una gran cantidad de calor con una pequeña cantidad de trabajo.

4. Análisis Comparativo Exhaustivo: Refrigeración Magnética vs. Compresión de Vapor

Una evaluación completa de la tecnología de refrigeración magnética requiere un análisis equilibrado de sus ventajas inherentes y los desafíos que actualmente limitan su adopción generalizada, en comparación directa con la tecnología dominante de compresión de vapor.

4.1. Ventajas Fundamentales de la Refrigeración Magnética

La refrigeración magnética ofrece un conjunto de ventajas transformadoras que abordan directamente las principales deficiencias de los sistemas convencionales.

- **Eficiencia Energética Superior:** El potencial de eficiencia es una de las ventajas más citadas. Mientras que los sistemas de compresión de vapor son una tecnología madura que se acerca a sus límites de eficiencia termodinámica, la refrigeración magnética opera con un ciclo de estado sólido que teóricamente puede ser más eficiente. Los prototipos y modelos sugieren mejoras de eficiencia del 20% al 30% ³, con algunas proyecciones teóricas que alcanzan hasta el 50%.¹³ Esta mejora podría traducirse en ahorros significativos de energía a escala global, dado que la refrigeración y el aire acondicionado representan una parte sustancial del consumo eléctrico mundial.
- **Impacto Ambiental Nulo (Directo):** Esta es, quizás, la ventaja más disruptiva. Al utilizar un refrigerante sólido (el material magnetocalórico) y un fluido de transferencia de calor benigno (como una mezcla de agua y alcohol), la refrigeración magnética elimina por completo la necesidad de refrigerantes gaseosos sintéticos (CFCs, HCFCs, HFCs).⁸ Esto significa que no hay riesgo de fugas de gases con alto Potencial de Calentamiento Global (GWP) o Potencial de Agotamiento del Ozono (ODP), lo que convierte a esta tecnología en una solución "verde" por diseño y la alinea con las regulaciones ambientales más estrictas.⁴
- **Características Operativas Mejoradas:**
 - **Funcionamiento Silencioso:** La ausencia de un compresor mecánico, la principal

fuentes de ruido en los refrigeradores convencionales, permite un funcionamiento casi silencioso. Esta característica es altamente deseable en aplicaciones domésticas, comerciales (hoteles, oficinas) y especializadas como equipos médicos y de laboratorio.³

- **Mayor Fiabilidad y Menor Mantenimiento:** La simplicidad mecánica, con significativamente menos piezas móviles sujetas a desgaste, promete una mayor fiabilidad y una vida útil más larga para los sistemas. Los requisitos de mantenimiento se reducen drásticamente al no haber necesidad de gestionar un refrigerante a alta presión ni de reparar fugas.⁷
- **Diseño Compacto y Flexible:** La eliminación del voluminoso compresor y sus componentes asociados permite diseños de sistemas más compactos y flexibles, lo que puede ser una ventaja en aplicaciones con espacio limitado, como la refrigeración de bebidas o vitrinas comerciales.⁸

4.2. Desventajas y Limitaciones Actuales

A pesar de su gran potencial, la tecnología de refrigeración magnética enfrenta importantes obstáculos que han frenado su comercialización a gran escala.

- **Alto Coste de Inversión Inicial:** Este es el principal desafío. Los dos componentes clave del sistema son caros. Los imanes permanentes de alto campo, típicamente de neodimio-hierro-boro (Nd-Fe-B), son costosos y dependen de materias primas de tierras raras, cuya cadena de suministro está geopolíticamente concentrada.⁵ El coste del imán puede suponer hasta el 40% del coste total del dispositivo.²⁸ Del mismo modo, los materiales magnetocalóricos de alto rendimiento, como el gadolinio (Gd), son también metales de tierras raras caros. Aunque se están desarrollando alternativas más baratas, su producción a gran escala aún no está madura.²⁹
- **Baja Densidad de Potencia de Enfriamiento:** Los prototipos actuales operan a bajas frecuencias de ciclo (típicamente 1-3 Hz).² Esto se debe a las limitaciones en la velocidad de transferencia de calor entre el MCM sólido y el fluido. Como resultado, la potencia de enfriamiento por unidad de volumen del refrigerador (densidad de potencia) es a menudo inferior a la de los sistemas de compresión de vapor, lo que los hace menos adecuados para aplicaciones que requieren una rápida eliminación de grandes cargas térmicas.³¹
- **Pérdidas por Histéresis:** Los materiales con el mayor efecto magnetocalórico, que son los que experimentan una transición de fase de primer orden (FOMT), sufren de histéresis térmica y magnética. Esto significa que el ciclo de magnetización-desmagnetización no es perfectamente reversible; una parte de la energía se pierde en forma de calor en cada ciclo, lo que reduce la eficiencia general del sistema. Minimizar la histéresis es un área de investigación activa en la ciencia de materiales.³¹

- **Necesidad de Apantallamiento Magnético:** Los potentes campos magnéticos generados por el sistema pueden interferir con dispositivos electrónicos cercanos, como marcapasos o tarjetas de crédito. Por lo tanto, se requiere un apantallamiento magnético eficaz para contener el campo dentro del dispositivo, lo que añade peso, volumen y coste al diseño final.¹⁹

La dicotomía entre el rendimiento del material y la viabilidad del sistema es un tema central en el desarrollo de la refrigeración magnética. Los materiales con el mayor MCE (los FOMT) son precisamente los que presentan los mayores desafíos de ingeniería: histéresis, inestabilidad mecánica y degradación cíclica. Por el contrario, los materiales de segundo orden (SOMT), como el gadolinio, son más estables y no tienen histéresis, pero su MCE es intrínsecamente menor. Este dilema sugiere que la comercialización exitosa no provendrá de un único "material milagroso", sino de un enfoque de co-diseño holístico. Este enfoque busca optimizar el sistema en su conjunto, posiblemente utilizando regeneradores en capas que combinan diferentes materiales o desarrollando nuevas clases de materiales, como las aleaciones de alta entropía, que buscan un equilibrio entre un rendimiento magnetocalórico robusto y propiedades mecánicas e ingenieriles superiores.

5. Componentes Tecnológicos Clave y Desafíos de Ingeniería

El desarrollo de un refrigerador magnético comercialmente viable depende de la optimización de sus componentes clave y de la superación de importantes desafíos de ingeniería, especialmente en el ámbito de los materiales y el diseño de sistemas.

5.1. Materiales Magnetocalóricos (MCMs): El Corazón del Sistema

El material magnetocalórico es el componente activo que impulsa el ciclo de refrigeración. La búsqueda del MCM ideal es un campo de investigación multidisciplinar que abarca la física del estado sólido, la química y la ciencia de los materiales. Un material óptimo debe cumplir una serie de criterios estrictos: un gran cambio de entropía magnética (ΔS_m) y de temperatura adiabática (ΔT_{ad}) cerca de la temperatura de funcionamiento deseada, una histéresis térmica y magnética mínima, una alta conductividad térmica para una transferencia de calor eficiente, una excelente estabilidad mecánica y química a lo largo de millones de ciclos, y estar compuesto por elementos abundantes, no tóxicos y de bajo coste.⁴

Análisis de Familias de Materiales

- **Gadolinio (Gd) y sus Aleaciones:** El gadolinio puro es el material de referencia para la refrigeración magnética a temperatura ambiente (su temperatura de Curie es de aproximadamente 294 K, o 21 °C). Exhibe un gran MCE y, crucialmente, su transición de fase es de segundo orden, lo que significa que no presenta histéresis magnética ni térmica, garantizando un ciclo perfectamente reversible.¹¹ Sin embargo, su principal desventaja es su elevado coste y su clasificación como metal de tierra rara crítica, lo que plantea problemas de disponibilidad y volatilidad de precios, limitando su uso en aplicaciones de mercado masivo.⁵
- **Aleaciones La-Fe-Si:** La familia de compuestos $\text{La}(\text{Fe},\text{Si})_{13}$ se considera la alternativa más prometedora al gadolinio. Estos materiales presentan un "efecto magnetocalórico gigante" asociado a una transición de fase magnetoestructural de primer orden, lo que significa que el cambio de estado magnético va acompañado de un cambio en el volumen de la celda unitaria.⁹ Sus ventajas son un MCE superior al del Gd, un coste mucho menor debido a que están compuestos principalmente de hierro, y la posibilidad de ajustar su temperatura de Curie a la temperatura ambiente mediante la hidrogenación o la sustitución parcial de Fe por Co.⁹ No obstante, esta familia de materiales se enfrenta a desafíos críticos:
 - **Fabricación y Escalabilidad:** La síntesis de la fase cúbica LaZn_{13} (1:13), responsable del gran MCE, es compleja. Los métodos tradicionales, como la fusión por arco, requieren largos y costosos tratamientos de recocido (de días a semanas) para obtener una fase pura.⁹ Se están investigando técnicas de solidificación rápida como el *melt spinning* (hilado por fusión) para reducir drásticamente el tiempo de recocido a horas o minutos. La fabricación aditiva (impresión 3D) también se explora para crear geometrías de regenerador complejas y optimizadas, aunque la escalabilidad y la eliminación de defectos siguen siendo un reto.³⁹
 - **Estabilidad a Largo Plazo:** Las aleaciones hidrogenadas, aunque eficaces para ajustar la temperatura de Curie, pueden ser inestables. Con el tiempo y el ciclado térmico, el hidrógeno puede desprenderse o redistribuirse de forma no homogénea, lo que degrada el rendimiento del material.⁴¹
 - **Propiedades Mecánicas y Corrosión:** La transición de fase de primer orden implica un cambio de volumen abrupto, lo que induce tensiones internas que pueden llevar a la pulverización del material tras un número relativamente bajo de ciclos (fatiga mecánica).³⁴ Además, al ser aleaciones con alto contenido en hierro y lantano (un elemento altamente oxofílico), son muy susceptibles a la corrosión cuando se utilizan con fluidos de transferencia de calor acuosos. Esto exige el desarrollo de recubrimientos protectores eficaces o el uso de inhibidores de corrosión en el fluido.⁴⁴
- **Aleaciones de Heusler:** Las aleaciones de Heusler (por ejemplo, Ni-Mn-X , donde $X = \text{In, Sn, Ga}$) son una clase de compuestos intermetálicos que también exhiben un MCE

significativo, a menudo acoplado a una transición de fase martensítica.⁴⁷ Su principal ventaja potencial reside en sus propiedades mecánicas superiores en comparación con las frágiles aleaciones La-Fe-Si.⁴⁹ Sin embargo, a menudo presentan una gran histéresis térmica y magnética, lo que supone una pérdida de energía significativa y es un obstáculo importante para su aplicación práctica.⁴⁷ La investigación actual se centra en la modificación de su composición para reducir esta histéresis.

- **Aleaciones de Alta Entropía (HEAs):** Este es un campo emergente en la ciencia de materiales que se aleja del diseño de aleaciones tradicionales basadas en uno o dos elementos principales. Las HEAs se componen de cinco o más elementos en concentraciones casi equimolares, lo que maximiza la entropía configuracional y puede estabilizar fases de solución sólida simples.³⁵ La hipótesis es que estas aleaciones podrían ofrecer una combinación única de propiedades funcionales (MCE) y mecánicas superiores (ductilidad, resistencia a la fatiga).⁵³ Actualmente, el MCE de la mayoría de las HEAs investigadas es modesto en comparación con los materiales de referencia, pero el vasto espacio composicional ofrece un enorme potencial para el descubrimiento de nuevos materiales de alto rendimiento.⁵⁴

Familia de Material	Tipo de Transición	ΔS_m Típico (J/kg·K)	ΔT_{ad} Típico (K)	TC (K)	Coste Relativo	Estabilidad Mecánica	Estabilidad Química	TRL
Gadolinio (Gd)	2º orden	~10 (para $\Delta H=5$ T)	~3-4 (para $\Delta H=1.5$ T)	~294	Muy Alto	Buena	Moderada	Alto
La(Fe,Si) ₁₃	1er orden	>20 (para $\Delta H=5$ T)	~5-8 (para $\Delta H=2$ T)	190-330 (ajustable)	Bajo	Pobre	Pobre	Medio
Aleaciones de Heusler	1er orden	5-20 (para $\Delta H=5$ T)	~2-6 (para $\Delta H=2$ T)	250-350 (ajustable)	Medio	Moderada-Buena	Buena	Bajo
Aleaciones de Alta Entropía	2º orden	<5 (para $\Delta H=5$ T)	~1-2 (para $\Delta H=2$ T)	Variable	Medio-Alto	Excelente	Excelente	Muy Bajo

Tabla 1: Comparativa de propiedades de las principales familias de materiales magnetocalóricos. Los valores de ΔS_m y ΔT_{ad} son representativos y pueden variar significativamente con la composición exacta y el campo magnético aplicado. TRL se refiere al Nivel de Madurez Tecnológica.

5.2. Sistemas de Generación de Campo Magnético

La fuente de campo magnético es el segundo componente más crítico y costoso de un refrigerador magnético.

- **Imanes Permanentes:** Para la comercialización masiva, especialmente en aplicaciones domésticas y comerciales, los imanes permanentes son la única opción viable, ya que no requieren un consumo continuo de energía para generar el campo.⁵⁵ Los imanes de neodimio-hierro-boro (Nd-Fe-B) son los preferidos debido a su altísima densidad de energía magnética. Los principales desafíos son su coste, la dependencia de las tierras raras (neodimio y disprosio), y el hecho de que su intensidad de campo está prácticamente limitada a menos de 2 Teslas (T) en configuraciones prácticas.²²
- **Diseño de Arreglos Magnéticos:** Para maximizar la eficiencia, es crucial diseñar un circuito magnético que concentre el campo en el volumen del regenerador y lo minimice en el exterior. Los **cilindros de Halbach** son un diseño avanzado que utiliza una disposición específica de segmentos de imanes para lograr precisamente esto, mejorando significativamente la eficiencia del sistema en comparación con configuraciones más simples.⁵⁶
- **Electroimanes y Superconductores:** Estos sistemas pueden generar campos magnéticos mucho más fuertes (> 5 T), lo que aumenta el MCE. Sin embargo, su uso se limita a prototipos de laboratorio y aplicaciones criogénicas especializadas debido a su gran tamaño, alto consumo de energía (en el caso de electroimanes resistivos) y la necesidad de sistemas de refrigeración complejos y costosos para mantener el estado superconductor.¹¹

5.3. Diseño de Regeneradores y Sistemas de Intercambio de Calor

La eficiencia de un sistema AMR está intrínsecamente ligada al diseño del regenerador y a la eficacia con la que el calor se transfiere entre el MCM sólido y el fluido.

- **Geometría del Regenerador:** La matriz del regenerador debe tener una alta área superficial por unidad de volumen para maximizar la transferencia de calor, pero también una baja resistencia al flujo para minimizar la potencia de bombeo requerida. Las geometrías comunes incluyen **lechos de esferas empaquetadas**, que son fáciles de fabricar, y **placas paralelas**, que teóricamente ofrecen una menor caída de presión para una misma eficiencia de transferencia de calor, pero son más difíciles de fabricar con precisión.¹⁸
- **Pérdidas del Sistema:** Un sistema real se ve afectado por varias fuentes de irreversibilidad que degradan su rendimiento. Las principales pérdidas incluyen la **potencia de bombeo** necesaria para superar la caída de presión en el regenerador y los intercambiadores de calor, la **conducción de calor axial** a lo largo del lecho del regenerador y las paredes del sistema (que tiende a destruir el gradiente de

temperatura), las **fugas de calor** desde el ambiente hacia el extremo frío, y las **pérdidas mecánicas** en los mecanismos que mueven los imanes o los lechos.² La minimización de estas pérdidas es un desafío de ingeniería clave.

6. Estado de la Comercialización, Aplicaciones y Perspectivas Futuras

Tras décadas de investigación fundamental, la refrigeración magnética está transitando del laboratorio al mercado, impulsada por la convergencia de avances en materiales, una mayor comprensión de la ingeniería de sistemas y una fuerte demanda de tecnologías de refrigeración sostenibles.

6.1. Prototipos y Sistemas Comerciales Notables

Varias empresas y grupos de investigación han desarrollado prototipos funcionales que demuestran la viabilidad de la tecnología a temperatura ambiente. Entre los pioneros se encuentran Astronautics Corporation y Toshiba, que ya a principios de la década de 2000 presentaron prototipos rotativos con imanes permanentes.¹ Más recientemente, una nueva ola de empresas está llevando la tecnología al umbral de la comercialización:

- **MAGNOTHERM (Alemania):** Esta empresa ha desarrollado sistemas que utilizan aleaciones de La-Fe-Si y afirma que su tecnología puede aumentar la eficiencia del ciclo hasta en un 30% en comparación con las alternativas. Ya han desplegado su producto "Polaris", un enfriador de bebidas, en supermercados del área de Frankfurt, demostrando su fiabilidad en un entorno comercial real.⁵⁹
- **Camfridge (Reino Unido):** Fundada en 2005, es una de las empresas más antiguas del sector. Se ha centrado en el desarrollo de aleaciones de bajo coste basadas en hierro (su "tercera generación" de aleaciones) para evitar el uso de gadolinio. Han demostrado la compacidad de su solución integrándola en un enfriador de bebidas de sobremesa con el mismo volumen de refrigeración que un modelo convencional.⁵
- **Ubiblue (Francia, anteriormente Cooltech Applications, ahora parte de Haier):** Esta empresa ha desarrollado prototipos para vitrinas de refrigeración comercial y enfriadores de vino, siendo uno de los actores clave en el mercado europeo.⁵

Estos esfuerzos han culminado en la creación de sistemas que, aunque todavía no son competitivos en coste para todas las aplicaciones, demuestran que los desafíos técnicos fundamentales están siendo superados.

Desarrollador	Año	Tipo de Sistema	Material MCM	Imán (Campo T)	Potencia de	ΔT (K)	COP
---------------	-----	-----------------	--------------	----------------	-------------	----------------	-----

					Enfriamiento (W)		
Astronautics	2001	Rotativo	Esferas de Gd	Permanente (1.5)	95	25	-
Toshiba	2003	Rotativo	Gd _{1-x} Dy _x	Permanente (0.76)	60	10	-
Univ. de Salerno	2016	Rotativo	Esferas de Gd	Permanente (1.2)	250	12	0.5 - 2.5
MAGNOTHERM	2024	Rotativo	La(Fe,Si) ₁₃	Permanente	5 kW - 15 kW (plataformas)	-	-
Cambridge	2023	-	Aleaciones base Fe	Permanente	-	-	-

Tabla 2: Rendimiento de prototipos notables de refrigeración magnética a temperatura ambiente. Los datos de MAGNOTHERM se refieren a las plataformas de desarrollo anunciadas. Fuentes:.¹

6.2. Análisis Tecno-Económico y Hoja de Ruta

El futuro comercial de la refrigeración magnética depende de su capacidad para competir económicamente con la tecnología de compresión de vapor.

- **Proyecciones de Mercado:** Los análisis de mercado son optimistas y proyectan un crecimiento exponencial. Un informe prevé que el mercado alcance los 2.16 mil millones de USD para 2030, con una Tasa de Crecimiento Anual Compuesta (CAGR) del 23.89%.²⁸ Otro informe es aún más agresivo, proyectando un mercado de 275 millones de USD para 2030 con un CAGR del 178.8%, partiendo de una base más pequeña en 2023.⁶⁵ Este crecimiento está impulsado por las regulaciones sobre refrigerantes y la creciente demanda de soluciones energéticamente eficientes.
- **Análisis de Costes:** El principal obstáculo sigue siendo el coste de inversión inicial. El análisis del ciclo de vida (LCA) muestra que, aunque la fase de uso es más eficiente, la fase de producción de un refrigerador magnético puede tener un mayor impacto ambiental debido a la minería y el procesamiento de las tierras raras para los imanes.⁶⁶ Sin embargo, el coste total de propiedad puede ser competitivo. Se estima que el ahorro de energía y mantenimiento puede llevar a períodos de amortización de menos de tres años en aplicaciones comerciales.⁶¹ La clave para la viabilidad económica a gran escala reside en reducir el coste de los imanes y de la producción en masa de los MCMs, con

un objetivo de coste para estos últimos por debajo de 1,000 USD/kg.¹³

- **Hoja de Ruta hacia la Comercialización:** La adopción de la tecnología probablemente seguirá una trayectoria escalonada:
 1. **Mercados Nicho de Alto Valor (Corto Plazo):** La tecnología ya es viable en aplicaciones donde sus ventajas únicas (precisión, bajo ruido, fiabilidad) son primordiales y el coste es un factor secundario. Esto incluye la criogenia para computación cuántica y detectores científicos, y la refrigeración de equipos médicos especializados.⁶⁷
 2. **Mercado Comercial (Mediano Plazo):** El siguiente paso es la penetración en el sector comercial, como enfriadores de bebidas, vitrinas de supermercados y cavas de vino. En este segmento, el ahorro energético y la eliminación de los costes de mantenimiento de los refrigerantes pueden justificar la inversión inicial.⁶ Los prototipos de MAGNOTHERM y Camfridge ya apuntan a este mercado.
 3. **Mercado Doméstico y HVAC (Largo Plazo):** La adopción masiva en refrigeradores domésticos y sistemas de aire acondicionado representa el mayor mercado potencial, pero también el desafío más grande. Requerirá reducciones de costes significativas a través de la producción en masa, la optimización del diseño y, potencialmente, el desarrollo de imanes sin tierras raras.⁶⁷

6.3. Aplicaciones Actuales y Emergentes

La versatilidad del MCE permite su aplicación en un amplio espectro de rangos de temperatura y escalas de potencia.

- **Criogenia y Licuefacción de Gases:** Esta es la aplicación más madura de la refrigeración magnética. Los refrigeradores de desmagnetización adiabática (ADR) se utilizan habitualmente en laboratorios para alcanzar temperaturas ultra bajas (sub-Kelvin) necesarias para la investigación en física fundamental y computación cuántica.⁶⁸ Además, la tecnología es muy prometedora para la licuefacción de gases como el hidrógeno, un paso crucial en la economía del hidrógeno, ya que podría ser un 50% más eficiente que los métodos convencionales.²⁵
- **Refrigeración Doméstica y Comercial:** Como se ha mencionado, este es el principal objetivo de la comercialización a temperatura ambiente. Los prototipos actuales se centran en enfriadores de bebidas y vitrinas, con el objetivo final de expandirse a refrigeradores y congeladores domésticos.⁵⁹
- **Bombas de Calor y HVAC:** El ciclo magnetocalórico es reversible, lo que significa que puede utilizarse tanto para enfriar como para calentar. Esto lo convierte en un candidato ideal para bombas de calor de alta eficiencia y sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC), un mercado con un enorme potencial de ahorro energético.⁶⁷
- **Aplicaciones Futuras:** A medida que la tecnología madure y los costes se reduzcan,

podrían surgir nuevas aplicaciones. El enfriamiento de centros de datos es un área de gran interés, donde la eficiencia energética es crítica.²⁸ También se están explorando aplicaciones en el sector del transporte, como sistemas de aire acondicionado para vehículos eléctricos, donde la eficiencia impacta directamente en la autonomía del vehículo, y en aplicaciones aeroespaciales, donde la fiabilidad y la ausencia de fluidos a presión son ventajas significativas.²⁷

7. Conclusión: El Futuro de la Refrigeración es Magnético

La refrigeración magnética ha evolucionado desde una curiosidad científica de laboratorio hasta convertirse en una tecnología de refrigeración de estado sólido con un potencial disruptivo tangible. Impulsada por una confluencia de avances en la ciencia de materiales y una creciente urgencia regulatoria y social para abandonar los refrigerantes dañinos para el medio ambiente, esta tecnología se encuentra en un punto de inflexión, al borde de la comercialización en nichos de mercado clave.

Los principios fundamentales del efecto magnetocalórico, magnificados por el ingenio del ciclo de Regenerador Magnético Activo, ofrecen una base sólida para desarrollar sistemas de refrigeración que son intrínsecamente más eficientes, silenciosos, fiables y, sobre todo, sostenibles que sus homólogos de compresión de vapor. Las ventajas son claras y abordan directamente las deficiencias más críticas de la tecnología de refrigeración actual.

Sin embargo, el camino hacia la adopción masiva no está exento de obstáculos. Los desafíos actuales son significativos y multifacéticos. El alto coste inicial, impulsado por la dependencia de imanes de tierras raras y procesos de fabricación de materiales magnetocalóricos aún no optimizados para la producción en masa, sigue siendo la barrera más formidable. Además, la durabilidad a largo plazo de los materiales más prometedores, como las aleaciones La-Fe-Si, en condiciones de ciclado continuo y en contacto con fluidos de transferencia de calor, debe ser demostrada de manera concluyente. La superación de estos desafíos requerirá una innovación continua y coordinada en múltiples frentes: desde el descubrimiento de nuevos materiales con propiedades mejoradas hasta el desarrollo de técnicas de fabricación escalables y rentables, y el diseño de sistemas integrados que optimicen cada componente del ciclo.

La hoja de ruta para la comercialización parece clara, comenzando con aplicaciones de alto valor donde el coste es menos sensible y las ventajas operativas son primordiales, para luego expandirse gradualmente a mercados más amplios a medida que la tecnología madura y las economías de escala reducen los costes. Las proyecciones de mercado reflejan un gran optimismo, anticipando un crecimiento exponencial en la próxima década.

En última instancia, la refrigeración magnética representa más que una simple mejora

tecnológica; es una reimaginación de cómo generamos frío. Si bien la transición completa puede llevar una década o más, la combinación de una fuerte presión regulatoria, la innovación incesante en la ciencia de los materiales y el claro potencial para un futuro energético más sostenible, sugiere que el futuro de la refrigeración es, efectivamente, magnético.

Obras citadas

1. New Prototype Magnetic Refrigerators Hold Commercial Promise, fecha de acceso: agosto 8, 2025, <https://www.aps.org/publications/apsnews/200305/refrigerators.cfm>
2. Magnetic Refrigeration: The Promise and the Problems - Scholarly Commons, fecha de acceso: agosto 8, 2025, <https://commons.erau.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2397&context=space-congress-proceedings>
3. What's so attractive about magnetic refrigeration? - CIBSE Journal, fecha de acceso: agosto 8, 2025, <https://www.cibsejournal.com/technical/the-appeal-of-magnetic-refrigeration/>
4. Magnetocaloric Refrigeration in the Context of Sustainability: A Review of Thermodynamic Bases, the State of the Art, and Future Prospects - MDPI, fecha de acceso: agosto 8, 2025, <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/14/3585>
5. Magnetic Refrigeration Market Size, Share, Trends and Growth Analysis 2032 - MarketsandMarkets, fecha de acceso: agosto 8, 2025, <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/magnetic-refrigeration-market-243034247.html>
6. Global Magnetic Refrigeration Market (2020 to 2025) - High Potential in Industrial Sector Presents Opportunities - ResearchAndMarkets.com, fecha de acceso: agosto 8, 2025, <https://www.businesswire.com/news/home/20201102005427/en/Global-Magnetic-Refrigeration-Market-2020-to-2025---High-Potential-in-Industrial-Sector-Presents-Opportunities---ResearchAndMarkets.com>
7. Magnetic Refrigeration | Richard Turton, fecha de acceso: agosto 8, 2025, https://richardturton.faculty.wvu.edu/files/d/119f32fe-e630-46c4-851e-a2b99a576391/magnetic_refrigerator.pdf
8. What is Magnetic Cooling? Explained | Okon Recycling, fecha de acceso: agosto 8, 2025, <https://www.okonrecycling.com/cooling-system-recycling/chiller-recycling/magnetic-cooling/>
9. A Short Review on the Evolution of Magnetocaloric La(Fe,Si)₁₃ and Its Fabrication through Melt Spinning | ACS Omega, fecha de acceso: agosto 8, 2025, <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.3c08622>
10. Magnetocaloric Coefficient and Magnetic Refrigeration - Stanford Advanced Materials, fecha de acceso: agosto 8, 2025, <https://www.samaterials.com/content/magnetocaloric-coefficient-and-magnetic-refrigeration.html>

11. Magnetocaloric effect - Wikipedia, fecha de acceso: agosto 8, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetocaloric_effect
12. Technology Tuesday: Magnetic Refrigeration — SJVCEO, fecha de acceso: agosto 8, 2025, <https://www.sjvceo.com/blogee/2019/10/24/technology-tuesday-magnetic-refrigeration-e6l9b>
13. Scale-up of Magnetocaloric Materials for High Efficiency Refrigeration Final Project Report, fecha de acceso: agosto 8, 2025, https://www.energy.ca.gov/sites/default/files/2024-06/CEC-500-2024-057_0.pdf
14. For Refrigeration Problems, a Magnetically Attractive Solution | NIST, fecha de acceso: agosto 8, 2025, <https://www.nist.gov/news-events/news/2009/01/refrigeration-problems-magnetically-attractive-solution>
15. Magnetic refrigeration, fecha de acceso: agosto 8, 2025, https://kawa.ac.ug/kawa-eLearning/content/physics/wikislice-physics-en/files/articles/Magnetic_cooling.htm
16. en.wikipedia.org, fecha de acceso: agosto 8, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetocaloric_effect#:~:text=Thermodynamic%20cycle,-Analogy%20between%20magnetic&text=The%20cycle%20is%20performed%20as,increases%20and%20decreases%20in%20pressure.
17. Analysis of Thermodynamic Cycles of Heat Pumps and Magnetic Refrigerators Using Mathematical Models - MDPI, fecha de acceso: agosto 8, 2025, <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/4/909>
18. Simplified Modeling of Active Magnetic Regenerators - UVIC, fecha de acceso: agosto 8, 2025, <https://www.uvic.ca/research/centres/iesvic/assets/docs/dissertations/Dissertation-Burdyny.pdf>
19. Disadvantages of Magnetocaloric Refrigeration | PDF - Scribd, fecha de acceso: agosto 8, 2025, <https://www.scribd.com/doc/174712126/Disadvantages-of-Magnetocaloric-Refrigeration>
20. The influence of the magnetic field on the performance of an active ..., fecha de acceso: agosto 8, 2025, https://orbit.dtu.dk/files/100219238/The_influence_of_the_magnetic_field_on_the_performance_of_an_active_magnetic_regenerator_AMR.pdf
21. Magnetic Cycles – An overview of research at UVic | AMRLab, fecha de acceso: agosto 8, 2025, <https://onlineacademiccommunity.uvic.ca/AMRLab/2017/01/07/magnetic-cycles-an-overview-of-research-at-uvic/>
22. 1 Active Magnetic Regenerative Cooling with Smaller Magnets ..., fecha de acceso: agosto 8, 2025, <https://www.osti.gov/servlets/purl/1765705>
23. Exploring the efficiency potential for an active magnetic regenerator, fecha de acceso: agosto 8, 2025, https://orbit.dtu.dk/files/134309779/Exploring_the_efficiency.pdf

24. Chapter 1 The magnetocaloric effect, fecha de acceso: agosto 8, 2025, https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/1789/1.CHAPTER_1.pdf
25. Magnetocaloric materials for hydrogen liquefaction - The Innovation, fecha de acceso: agosto 8, 2025, <https://www.the-innovation.org/article/doi/10.59717/j.xinn-mater.2023.100045>
26. Constraints on the adiabatic temperature change in magnetocaloric materials | Phys. Rev. B, fecha de acceso: agosto 8, 2025, <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.81.054423>
27. Magnetic Refrigeration 101: Heat Transfer Basics - Number Analytics, fecha de acceso: agosto 8, 2025, <https://www.numberanalytics.com/blog/magnetic-refrigeration-heat-transfer-basics>
28. Magnetic Refrigeration Market Size, Growth & Outlook 2025 – 2030, fecha de acceso: agosto 8, 2025, <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/magnetic-refrigeration-market>
29. Magnetic Cooling - RefIndustry, fecha de acceso: agosto 8, 2025, <https://refindustry.com/articles/articles/magnetic-cooling/>
30. Magnetocaloric effect and applied refrigeration performance of La(Fe,Si)₁₃-based compounds - ResearchGate, fecha de acceso: agosto 8, 2025, https://www.researchgate.net/publication/381074382_Magnetocaloric_effect_and_applied_refrigeration_performance_of_LaFeSi13-based_compounds
31. ece.engineering.gwu.edu, fecha de acceso: agosto 8, 2025, <https://ece.engineering.gwu.edu/magnetic-refrigeration-technology#:~:text=Answer%3A%20Some%20of%20the%20main,sufficiently%20wide%20operating%20temperature%20range.>
32. Solutions to obstacles in the commercialization of room-temperature magnetic refrigeration, fecha de acceso: agosto 8, 2025, <https://ideas.repec.org/a/eee/rensus/v143y2021ics1364032121002252.html>
33. Materials Challenges for High Performance Magnetocaloric ..., fecha de acceso: agosto 8, 2025, https://www.researchgate.net/publication/264404676_Materials_Challenges_for_High_Performance_Magnetocaloric_Refrigeration_Devices
34. Novel Design of La(Fe,Si)₁₃ Alloys Towards High Magnetic Refrigeration Performance | Request PDF - ResearchGate, fecha de acceso: agosto 8, 2025, https://www.researchgate.net/publication/44639989_Novel_Design_of_LaFeSi13_Alloys_Towards_High_Magnetic_Refrigeration_Performance
35. New High Entropy Alloys for Magnetocaloric Applications. Thesis advisors - ECMetAC, fecha de acceso: agosto 8, 2025, <https://www.ecmetac.eu/images/PhD-offer-LUE.pdf>
36. Low-Cost Magnetocaloric Materials Discovery - Hydrogen Program, fecha de acceso: agosto 8, 2025, https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/progress19/ins_in012_ihnfeldt_2019.pdf?sfvrsn=421de0c2_1
37. patents.google.com, fecha de acceso: agosto 8, 2025,

<https://patents.google.com/patent/CN105957672A/en#:~:text=Among%20many%20magnetocaloric%20materials%2C%20lanthanum,the%20most%20promising%20magnetocaloric%20materials.>

38. Tuning the Magnetocaloric Properties of the La(Fe,Si)₁₃ Compounds by Chemical Substitution and Light Element Insertion - MDPI, fecha de acceso: agosto 8, 2025, <https://www.mdpi.com/2312-7481/7/1/13>
39. Opportunities and challenges of additive manufacturing toward magnetic refrigeration, fecha de acceso: agosto 8, 2025, <https://www.the-innovation.org/article/doi/10.59717/j.xinn-mater.2023.100032>
40. A Short Review on the Evolution of Magnetocaloric La(Fe,Si)₁₃ and Its Fabrication through Melt Spinning - ResearchGate, fecha de acceso: agosto 8, 2025, https://www.researchgate.net/publication/378909892_A_Short_Review_on_the_Evolution_of_Magnetocaloric_LaFeSi_13_and_Its_Fabrication_through_Melt_Spinning
41. Stability and Magnetocaloric Properties of Sintered La(Fe, Mn, Si)₁₃ ..., fecha de acceso: agosto 8, 2025, https://www.researchgate.net/publication/252060450_Stability_and_Magnetocaloric_Properties_of_Sintered_LaFe_Mn_Si_13H_z_Alloys
42. Mastering hysteresis in magnetocaloric materials | Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences - Journals, fecha de acceso: agosto 8, 2025, <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsta.2015.0308>
43. LaFeSi - Functional Materials - Materialwissenschaft - TU Darmstadt, fecha de acceso: agosto 8, 2025, https://www.mawi.tu-darmstadt.de/fm/research_fm/research_topics_fm/magnetocaloric_materials_fm/lafesi/lafesi.en.jsp
44. Stable Operation of Copper-Protected La(FeMnSi)₁₃Hy Regenerators in a Magnetic Cooling Unit - ACS Publications, fecha de acceso: agosto 8, 2025, <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acsaenm.4c00747>
45. Magnetocaloric La(Fe,Mn,Si)₁₃hz Particles and Their Chemical Stability in Heat Transfer Fluids Employed in Magnetic Refrigeration | Request PDF - ResearchGate, fecha de acceso: agosto 8, 2025, https://www.researchgate.net/publication/367738541_Magnetocaloric_LaFeMnSi_13hz_Particles_and_Their_Chemical_Stability_in_Heat_Transfer_Fluids_Employed_in_Magnetic_Refrigeration
46. Unlocking the Potential of Magnetic Refrigeration: Investigating the Compatibility of the Ga-Based Liquid Metal with a La(Fe,Mn,Si)₁₃Hz Magnetocaloric Material for Enhanced Long-Term Stability | ACS Omega - ACS Publications, fecha de acceso: agosto 8, 2025, <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.3c06724>
47. Heusler Alloys and Magnetocaloric Effect - ResearchGate, fecha de acceso: agosto 8, 2025, <https://www.researchgate.net/topic/Heusler-Alloys~Magnetocaloric-Effect/publications>
48. Crystal Structure and Properties of Heusler Alloys: A Comprehensive Review -

- MDPI, fecha de acceso: agosto 8, 2025, <https://www.mdpi.com/2075-4701/14/6/688>
49. All-d-Metal Heusler Alloys: A Review - MDPI, fecha de acceso: agosto 8, 2025, <https://www.mdpi.com/2075-4701/13/1/111>
 50. Current perspective in magnetocaloric materials research - AIP Publishing, fecha de acceso: agosto 8, 2025, <https://pubs.aip.org/aip/jap/article/133/4/040903/2866406/Current-perspective-in-magnetocaloric-materials>
 51. Review Paper A Short Review of Magnetocaloric Effect in Ni-Mn-Ga Heusler Alloy System - ISROSET, fecha de acceso: agosto 8, 2025, https://www.isroset.org/pub_paper/IJSRPAS/3-ISROSET-IJSRPAS-08819.pdf
 52. Pushing the limits of magnetocaloric high-entropy alloys - Bohrium, fecha de acceso: agosto 8, 2025, <https://www.bohrium.com/paper-details/pushing-the-limits-of-magnetocaloric-high-entropy-alloys/811899075820519425-2143>
 53. (PDF) Review on magnetocaloric high-entropy alloys: Design and analysis methods, fecha de acceso: agosto 8, 2025, https://www.researchgate.net/publication/363497061_Review_on_magnetocaloric_high-entropy_alloys_Design_and_analysis_methods
 54. Pushing the limits of magnetocaloric high-entropy alloys | APL Materials | AIP Publishing, fecha de acceso: agosto 8, 2025, <https://pubs.aip.org/aip/apm/article/9/8/080702/123007/Pushing-the-limits-of-magnetocaloric-high-entropy>
 55. Magnetic Refrigeration | Apex Magnets Blog, fecha de acceso: agosto 8, 2025, <https://www.apexmagnets.com/news-how-tos/magnetic-refrigeration-apex-magnets/>
 56. Review and comparison of magnet designs for magnetic refrigeration, fecha de acceso: agosto 8, 2025, https://orbit.dtu.dk/files/100219269/Review_and_comparison_of_magnet_designs_for_magnetic_refrigeration.pdf
 57. Magnetic Refrigeration with Recycled Permanent Magnets and Free Rare-Earth Magnetocaloric La-Fe-Si - PMC, fecha de acceso: agosto 8, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7380313/>
 58. Active magnetic regenerator performance enhancement using ..., fecha de acceso: agosto 8, 2025, https://www.researchgate.net/publication/243293402_Active_magnetic_regenerator_performance_enhancement_using_passive_magnetic_materials
 59. Magnetic Refrigeration: A Revolutionary, Disruptive Cooling ..., fecha de acceso: agosto 8, 2025, <https://refindustry.com/articles/techguides/magnetic-refrigeration-revolutionizing-cooling-technology-with-the-magnetocaloric-effect/>
 60. MAGNOTHERM - Refrigerant-Free Cooling, fecha de acceso: agosto 8, 2025, <https://www.magnotherm.com/>
 61. Camfridge: Magnetic Refrigeration Technology is Ready to Scale - RefIndustry,

fecha de acceso: agosto 8, 2025,

<https://refindustry.com/articles/interview/camfridge-magnetic-refrigeration-technology-is-ready-to-scale/>

62. Design and performance study of the active magnetic refrigerator for room-temperature application | Request PDF - ResearchGate, fecha de acceso: agosto 8, 2025,
https://www.researchgate.net/publication/223293299_Design_and_performance_study_of_the_active_magnetic_refrigerator_for_room-temperature_application
63. Technology - Magnotherm, fecha de acceso: agosto 8, 2025,
<https://www.magnotherm.com/technology>
64. Magnetic Refrigeration: Design, construction and evaluation of a valve switched rotary prototype. Numerical modeling of a solid - Universidad de Zaragoza, fecha de acceso: agosto 8, 2025, <https://zaguan.unizar.es/record/107444/files/TESIS-2021-278.pdf>
65. In-Depth Industry Outlook: Magnetic Refrigeration Market Size & Forecast, fecha de acceso: agosto 8, 2025,
<https://www.verifiedmarketresearch.com/product/magnetic-refrigeration-market/>
66. (PDF) Magnetic vs. vapor-compression household refrigerators: A ..., fecha de acceso: agosto 8, 2025,
https://www.researchgate.net/publication/260608910_Magnetic_vs_vapor-compression_household_refrigerators_A_preliminary_comparative_life_cycle_assessment
67. Magnetic Refrigeration Technology | Department of Electrical and Computer Engineering - GWU ECE - The George Washington University, fecha de acceso: agosto 8, 2025, <https://ece.engineering.gwu.edu/magnetic-refrigeration-technology>
68. Magnetic Refrigeration Technology - Kiutra, fecha de acceso: agosto 8, 2025,
<https://kiutra.com/technology/>
69. magnetic refrigeration applications: Topics by Science.gov, fecha de acceso: agosto 8, 2025,
<https://www.science.gov/topicpages/m/magnetic+refrigeration+applications>