

## **Producción de frío a partir de campos magnéticos. Parte I: Conceptos básicos**

*Juan Esteban Velásquez\**, *Farid Chejne\*\** y *Alan Hill\*\*\**

(Recibido el 11 de septiembre de 2002)

### **Resumen**

El empleo de campos magnéticos para la generación de frío se está abriendo paso como una alternativa muy eficiente dentro de las técnicas de refrigeración. Esta tecnología se fundamenta en el cambio de entropía que experimentan algunos materiales magnéticos o superconductores cuando se someten a campos magnéticos fuertes. El trabajo se presenta en dos partes: en la primera, se describe el fenómeno magnetocalórico, se compara el ciclo de refrigeración convencional con el ciclo de refrigeración magnética, se presentan las ventajas y desventajas de esta técnica y por último, se describen las aplicaciones más relevantes. En la segunda parte se presentará un análisis termodinámico de un refrigerador magnético.

----- *Palabras clave:* refrigeración magnética, efecto magnetocalórico, materiales magnéticos.

## **Cold production from magnetic fields; Part I: Basic concepts**

### **Abstract**

The use of magnetic fields for cold generation is emerging as a highly efficient alternative refrigeration technique. This technology is based on the entropy change that some magnetic or superconducting materials follow when they are placed under strong magnetic fields. The paper is presented in two parts: in the first one, a description of magnetocaloric phenomenon, the operation of a magnetic refrigeration cycle, the advantages and disadvantages of this technique, and the most important applications are presented. In the second part, a thermodynamic analysis for a magnetic refrigerator is presented.

----- *Key words:* magnetic refrigeration, magnetocaloric effect, magnetic materials.

---

\* Instituto de Energía y Termodinámica. Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín. [juanesv@epm.net.co](mailto:juanesv@epm.net.co).

\*\* Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. [fchejne@perseus.unalmed.edu.co](mailto:fchejne@perseus.unalmed.edu.co).

\*\*\* Instituto de Energía y Termodinámica. Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín.

## Introducción

En la naturaleza, los campos magnéticos tienen una infinidad de aplicaciones. Tal vez, la aplicación más importante es la generación de trabajo eléctrico, ya que actualmente la mayor parte de la energía eléctrica se produce mediante inducción electromagnética. En las últimas décadas se ha venido desarrollando una nueva aplicación de los campos magnéticos: la producción de frío, la cual seguramente revolucionará el mundo tecnológico en esta área.

La producción de frío a partir de campos magnéticos se fundamenta en el efecto magnetocalórico, según el cual, algunos materiales cambian de temperatura cuando se magnetizan o se desmagnetizan [1, 2, 3].

Este fenómeno fue descubierto en 1881 por Warburg, y la explicación del mismo fue dada por Weiss y Piccard en 1918. Unos años más tarde, en 1925, W.F. Giaque y P. Debye sugirieron de manera independiente el empleo de este fenómeno para producir temperaturas tan bajas como 0,3 K [4]. La propuesta de Debye y Giaque consistía en poner una sustancia paramagnética en contacto con helio líquido, separada de éste por helio gaseoso y reducir la temperatura del conjunto del sistema hasta aproximadamente 1 K. Si luego el sistema se ubicaba dentro de un campo magnético, las moléculas de la sustancia paramagnética se alinearían paralelamente a las líneas de fuerza del campo, y al hacerlo, generarían calor. Si este calor se expulsa mediante una ligera evaporación posterior del helio circundante, y el campo magnético se suprime, las moléculas paramagnéticas inmediatamente tomarían una orientación errática, absorbiendo calor mientras lo hacen. Como la única fuente de calor sería el helio líquido, su temperatura descendería, en consecuencia, por debajo de 0,5 K [4].

En 1933, Giaque consiguió llevar a la práctica la teoría. Impuso un campo magnético al sulfato de gadolinio, y luego lo dejó desordenarse al retirar el campo. La retirada en desorden requería

calor y lo absorbió del helio circundante. De esta manera bajó la temperatura a 0,25 K [4]. Al cabo de uno años, otros alcanzaban los 0,0185 K utilizando la misma técnica y en el presente se ha logrado bajar la temperatura por debajo de 1  $\mu$ K.

Por éste y sus posteriores trabajos en materia de temperaturas ultrafrías, Giaque fue galardonado con el premio Nobel de química en 1949.

En 1952, Constantin Chilowsky publicó una patente (USP No. 2.589.775) [5] en la cual presentó un esquema físico y un método de operación de un refrigerador magnético. A partir de entonces se han logrado enormes avances en la aplicación tecnológica de este principio.

En 1978, William Steyert, Jr., del laboratorio Nacional de Los Alamos (en New México, USA), publicó la patente USP No. 4.107.935 [6] donde se explica el funcionamiento de un regenerador magnético tipo rueda. Dicho trabajo fue continuado por John Barclay, también en Los Alamos (USP No. 4.408.463) [7] y se constituyen en el fundamento de la mayoría de los refrigeradores magnéticos modernos.

Otras patentes publicadas han presentado modificaciones interesantes a partir de la patente de Chilowsky en 1952, como, USP No. 3.108.444 de David Kahn [8]; USP No. 3.413.814 por Johannes Rudolphus van Geuns *et al.* [9]; USP No. 4.033.734 de Steyert *et al.* [10]; USP No. 4.464.903 [11], USP No. 4.509.334 [12], USP No. 4.589.953 de Nakagone *et al.* [13]; USP No. 4.642.994 [14], USP No. 4.702.090 de Barclay *et al.* [15] y USP No. 2002/0053209 A1 de Zimm *et al.* [16].

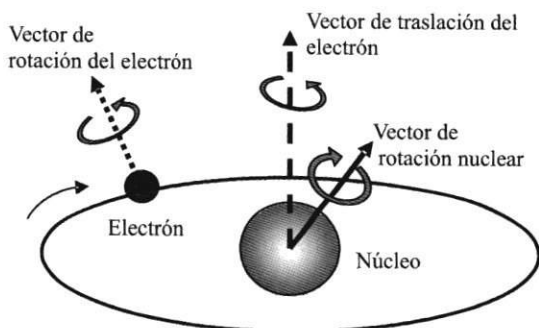
Actualmente, la mayor parte de la investigación en refrigeración magnética se lleva a cabo en el Ames Laboratory en la Universidad de Iowa, en el Astronautics Corporation of America in Madison, Wisconsin y más recientemente en compañías japonesas como Toshiba y Chubu Electric Power Co.

## Características magnéticas de los materiales

Debido al movimiento de los electrones y protones en el interior de los átomos que constituyen la materia, se generan corrientes de carga eléctricas. Dichas corrientes ligadas o asociadas a la estructura atómica, son de tres tipos (ver figura 1):

- Las atribuidas a los electrones en órbita.
- Las asociadas con el spin del electrón.
- Las asociadas con el spin nuclear.

Los movimientos de rotación y traslación de las partículas en los átomos se pueden representar mediante vectores, cuya orientación está dada por el eje con respecto al cual se realiza el movimiento. Así por ejemplo, el vector de traslación de un electrón se ubica en el centro del núcleo y su dirección es perpendicular al plano de traslación del electrón (ver figura 1). La magnitud de dichos vectores está dada por el producto de la corriente eléctrica y del área de circulación. Estos vectores se suelen conocer como vectores de momento magnético.



**Figura 1** Elementos de corriente en la estructura atómica

Debido a la existencia de dichas cargas eléctricas en movimiento, se generan campos magné-

ticos internos en los átomos. Por tal razón, si se aplica un campo magnético externo a un material se producen efectos de interacción, que tienden a alinear los campos internos con los externos y se produce una nueva orientación de los movimientos de circulación de las cargas eléctricas internas. Según sea dicha interacción entre los campos magnéticos, las propiedades magnéticas de los materiales son diferentes.

La temperatura –y las agitaciones térmicas aleatorias– inciden considerablemente en los alineamientos de los momentos magnéticos al interior de los átomos y por tanto, altera significativamente los efectos magnéticos.

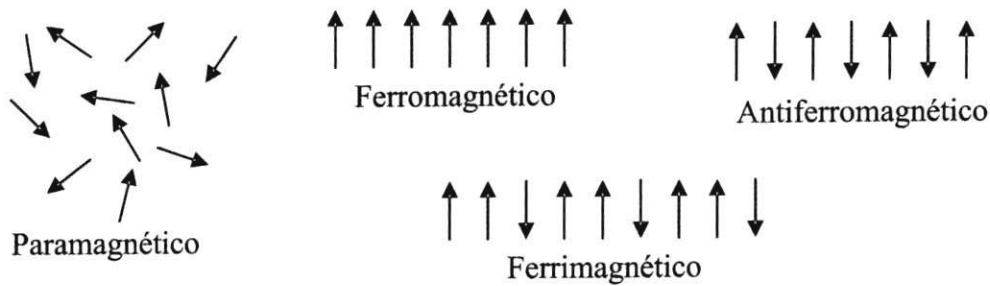
En resumen, cada átomo contiene muchas componentes diferentes de interacción magnética y su combinación determina las características magnéticas del material. Según sus características los materiales se clasifican en cinco tipos diferentes: diamagnético, paramagnético, ferromagnético, antiferromagnético y ferrimagnético [17]. En la figura 2 se presenta un esquema de las orientaciones de los momentos magnéticos de los distintos materiales.

A continuación se explican las características más relevantes de los materiales diamagnéticos, ferromagnéticos y paramagnéticos. Estos dos últimos tienen una importante aplicación en el campo de la refrigeración magnética.

### **Materiales diamagnéticos**

Los materiales diamagnéticos, son aquellos constituidos por átomos en los cuales los campos magnéticos pequeños producidos por el movimiento de los electrones en sus órbitas y aquellos producidos por el espín del electrón se combinan para producir un campo magnético neto cero.

Un campo magnético externo sólo produce una torsión despreciable sobre el átomo, así que no se genera realineamiento de los campos dipolares y el campo magnético interno es ligeramente inferior al campo aplicado.



**Figura 2** Diagrama de las orientaciones de los momentos de espín de distintos materiales magnéticos

### ***Materiales paramagnéticos***

Un material paramagnético es aquél en el cual los efectos del espín del electrón y del movimiento orbital no se cancelan completamente. El átomo como un todo tiene un pequeño momento magnético, pero la orientación al azar de los átomos en una muestra grande produce un momento magnético promedio de cero (ver figura 2). Sin embargo, cuando se aplica un campo externo, existe una pequeña torsión en cada momento atómico, y estos momentos tienden a alinearse con el campo magnético externo. Este alineamiento conduce al aumento del valor del campo magnético dentro del material sobre el valor externo.

### ***Materiales ferromagnéticos***

Los materiales ferromagnéticos se caracterizan porque cada átomo tiene un momento dipolar relativamente grande, causado principalmente por los momentos de espín del electrón no equilibrados. Las fuerzas interatómicas causan que estos momentos se alineen en forma paralela por regiones que contienen un gran número de átomos.

Si un material ferromagnético se calienta hasta que las energías térmicas excedan las energías de acoplamiento, ocurre una transición de fase, el material se desorganiza en un paramagneto (desaparece el imán) aunque al enfriarse vuelve a ser un ferromagneto (se restaura el imán). A la temperatura crítica a la que ocurre esto se le conoce como la temperatura de Curie.

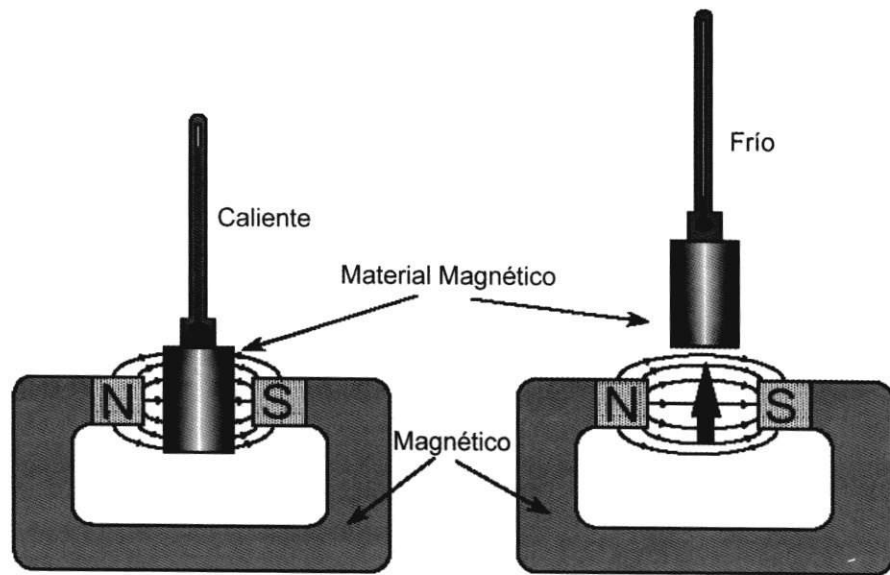
### **Fenómeno de refrigeración magnética**

#### ***Efecto magnetocalórico***

El efecto magnetocalórico es un fenómeno en el cual se presenta un cambio en el ordenamiento estructural o arreglo tridimensional de los átomos o moléculas de un material. Este efecto consiste en el calentamiento de una sustancia cuando ésta se somete a un campo magnético y en su enfriamiento cuando dicho campo se retira (ver figura 3).

El efecto magnetocalórico ocurre en aquellas sustancias cuya entropía (una medida del orden del sistema) es afectada por la temperatura y por la magnitud del campo magnético al cual se somete. Los materiales en los cuales este fenómeno es importante se pueden clasificar en dos grupos: los magnéticos, que incluye los materiales paramagnéticos, ferromagnéticos y los ferrimagnéticos, y los materiales superconductores. La naturaleza y la explicación de este fenómeno son diferentes para cada grupo.

En el caso de los materiales magnéticos, la explicación del fenómeno radica en el alineamiento que experimentan los átomos o las moléculas cuando se aplica el campo magnético externo. Las sustancias almacenan energía debido a sus vibraciones atómicas; cuando se aplica el campo externo, éstas se ven reducidas (y por tanto se produce un ordenamiento del sistema y una disminución de la entropía), siendo necesario que



**Figura 3** Ilustración del comportamiento de un material magnético en un campo magnético

el material libere energía, en forma de calor. Si el material se encuentra aislado térmicamente del ambiente, se produce aumento de la temperatura (manteniendo constante la entropía). Cuando se retira el campo magnético, los átomos del material pueden empezar a vibrar aleatoriamente de nuevo y por tanto están en capacidad de absorber energía de los alrededores.

Para los materiales superconductores la naturaleza del fenómeno se fundamenta en el cambio del estado superconductor al estado normal, cuando el material se somete a un campo magnético de suficiente intensidad. En el estado superconductor, los materiales se caracterizan por la existencia de un número muy grande de pares de electrones de spins opuestos (llamados pares de Cooper), que se mueven libremente en la sustancia. Cuando se aplica el campo magnético, dichos pares de electrones se destruyen y el material pasa a un estado más desordenado. Como consecuencia del aumento de la entropía del sistema, el material absorbe calor de los alrededores, o si se encuentra aislado térmicamente, disminuye su temperatura para mantener constante su entropía. Si por el contrario, el material se lleva desde el estado normal al superconduc-

tor (más ordenado) se produce un incremento de la temperatura o una liberación de calor.

### ***Refrigeración y transiciones de fase***

Una fase es una región de uniformidad en un sistema, es decir, una porción del espacio en la cual la composición química y las propiedades físicas no cambian significativamente en cada punto. Por ejemplo, cuando se tiene un sistema que contiene líquido y vapor, se tienen dos fases, ya que al interior del líquido o del vapor, las propiedades pueden ser prácticamente iguales en cada punto, sin embargo, son muy distintas entre sí. En el límite de fase entre el líquido y el vapor ocurre un cambio brusco en la magnitud de las propiedades.

De otro lado, una transición de fase es un cambio en el ordenamiento molecular o atómico que involucra un brinco en los estados energéticos del sistema. Existen dos tipos de transiciones de fase: de primer orden o primera especie y de segundo orden o especie.

En una transición de fase de primer orden o primera especie ocurre un cambio brusco y repentino en el ordenamiento o distribución espacial de



los átomos o moléculas de la sustancia y un cambio en el volumen específico. Los ejemplos de este tipo de transición son muy comunes en la naturaleza. Algunos de ellos son, por ejemplo, los fenómenos de evaporación, licuefacción, solidificación o fusión, donde se pasa de un estado de agregación de la materia como sólido, líquido o gaseoso a otro estado de características diferentes.

En las transiciones de segundo orden no ocurre un cambio discontinuo en el estado de la sustancia o en su volumen específico, aunque sí se produce un cambio repentino en la distribución tridimensional de los átomos o moléculas, un cambio de la simetría interna de la sustancia. Un ejemplo de estas transiciones de segundo orden es el cambio de ferromagnetismo a paramagnetismo en sustancias que cruzan la temperatura de Curie. Otro ejemplo, es el paso del estado de superconductividad a estado normal en ciertos materiales una vez se sobrepasa la temperatura crítica. El efecto magnetocalórico es más relevante cuando se presenta una transición de fase de segunda especie.

En todas las transiciones de fase se presenta un cambio en la magnitud de las distintas formas de energía (y en la entropía) del sistema. Así por ejemplo, para pasar de un estado líquido o vapor se requiere de una energía de vaporización que se obtiene bien sea del sistema que está cambiando de fase (con su consecuente enfriamiento) o de sus alrededores. Estos cambios energéticos se pueden aprovechar para generar trabajo o propiciar un flujo de calor.

La mayoría de los sistemas de refrigeración aprovechan los cambios en los estados energéticos que ocurren en las transiciones de fase para retirar calor de un sitio y depositarlo en otro. Sin embargo, los sistemas convencionales se basan en transiciones de fase de primer orden, mientras que un sistema de refrigeración magnética se basa en una transición de segundo orden.

### ***Materiales magnetocalóricos***

Aunque todos los materiales se encuentran sujetos al fenómeno magnetocalórico, en la mayoría

de las sustancias dicho fenómeno es imperceptible, así que se requiere hacer una selección adecuada del material para cualquier aplicación tecnológica.

El requerimiento más importante para que un material se pueda emplear en una aplicación magnetocalórica es que la razón entre el cambio de entropía asociado con la orientación de los espines magnéticos en un campo magnético y el cambio de entropía debido a otros fenómenos sea suficientemente grande. Otra forma de expresar esta condición es que la magnitud del efecto magnetocalórico sea importante, es decir, que la aplicación de un campo magnético no muy grande ocasione que una gran cantidad de calor sea liberado por el material. Esto se logra escogiendo un material magnético con grandes momentos magnéticos o un material con temperatura de Curie muy cercana a las temperatura del ciclo de refrigeración.

Otros requerimientos para que un material se pueda emplear como magnetocalórico en un intervalo de temperatura específico son [10]:

- El material no debe presentar ordenamiento antiferromagnético en la temperatura de trabajo, ya que estos no son afectados significativamente por los campos magnéticos externos. Esto se garantiza siempre y cuando la temperatura de Neel (temperatura a la cual un material pasa de un estado paramagnético a antiferromagnético), en caso de que exista, esté por debajo de la temperatura de la fuente de calor.
- El calor específico del material relacionado con efectos electrónicos y cristalinos debe ser pequeño en comparación con el calor específico propio de los efectos magnéticos, para garantizar que la capacidad refrigerante del material sea grande, de lo contrario, será necesario circular en exceso el fluido refrigerante.
- El material debe ser estable, es decir no se debe descomponer químicamente, ni reaccionar debido a los cambios de temperatura.

Las investigaciones en materiales para refrigeradores magnéticos han sido orientadas principalmente al estudio de las tierras raras, bien sea en su estado puro o combinado con otros metales en aleaciones o compuestos.

Probablemente, el mejor material magnetocalórico para el intervalo de temperaturas entre 250 y 310 K es el gadolinio. En dicho material, la magnitud del efecto magnetocalórico es dos a tres veces más grande que en el hierro. Además, el efecto magnetocalórico alcanza su máximo cerca de la temperatura de Curie, la cual para el gadolinio es de 20 °C, mientras que para el hierro es de 770.

Otras tierras raras como erbio, terbio y disprosio también se pueden usar. Estos elementos combinados con otros para formar tierras raras in-

termetálicas permiten obtener una amplia variedad de compuestos que se pueden usar en cualquier intervalo práctico de temperaturas. Algunos ejemplos se presentan en la tabla 1 [7].

Normalmente los materiales ferromagnéticos permiten únicamente un intervalo máximo de temperatura entre 40 y 50 K, mientras que un material paramagnético tiene un intervalo inferior a 25 K. Si se desea operar en un intervalo de temperaturas mayor, es necesario combinar varios materiales en serie, de tal forma que cada uno de ellos opere óptimamente en una fracción del dicho intervalo.

Los materiales superconductores también se pueden emplear en refrigeradores magnetocalóricos, sin embargo, tienen varias limitaciones: la primera de ellas es que las temperaturas de ope-

**Tabla 1** Materiales magnetocalóricos y sus temperaturas de Curie

<i>Compuesto</i>	<i>Temperatura Curie (K)</i>	<i>Compuesto</i>	<i>Temperatura Curie (K)</i>
Gd	293	Dy <sub>2</sub> Er <sub>0,8</sub> Al <sub>0,2</sub>	25
GdN	65	MnAs	318
Gd <sub>3</sub> Al <sub>2</sub>	287	MnP	298
Gd <sub>5</sub> Si <sub>4</sub>	336	CrTe	333
Gd <sub>6</sub> Mn <sub>23</sub>	480	GdFe <sub>2</sub>	795
Gd <sub>2</sub> Fe <sub>17</sub>	490	GdRu <sub>2</sub>	83
GdOs <sub>2</sub>	65	GdMg	120
GdMg <sub>2</sub>	81	GdZn	268
GdCd	~250	GdAl <sub>2</sub>	~165
GdGa	190	Gd <sub>3</sub> In	~213
Gd <sub>4</sub> Co <sub>3</sub>	~220	GdCo <sub>3</sub>	~610
GdCo <sub>5</sub>	~1.000	Gd <sub>2</sub> Co <sub>17</sub>	~1.200
GdRh	25	GdRh <sub>2</sub>	74
GdIr <sub>2</sub>	89	GdNi	~70
GdNi <sub>2</sub>	~72	GdNi <sub>3</sub>	~118
Gd <sub>2</sub> Ni <sub>7</sub>	~120	GdNi <sub>5</sub>	~30
Gd <sub>2</sub> Ni <sub>17</sub>	~200	Gd <sub>5</sub> Pd <sub>2</sub>	335
GdPd	~40	GdPt <sub>2</sub>	~50

ración son bastante restringidas, y sólo se emplean para aplicaciones criogénicas. La segunda desventaja es que el cambio de entropía debido a la aplicación de un campo magnético es de 1 a 2 veces más pequeño que para otros materiales magnéticos.

### Ciclo de refrigeración magnética

Un refrigerador magnético consta básicamente de un imán o electroimán que genera un campo magnético alto, un material magnetocalórico el cual se enfría en un proceso de magnetización adiabática, un mecanismo para magnetizar y

desmagnetizar repetidamente el material magnético, un contenedor adiabático para contener el material y por último un fluido de intercambio que retire o suministre calor al material magnético y que se encuentre en contacto con la fuente y el sumidero de calor.

### Descripción del ciclo de refrigeración

El ciclo de refrigeración magnética es equivalente al ciclo de refrigeración por compresión de un gas y consta de los siguientes pasos (ver figura 4):

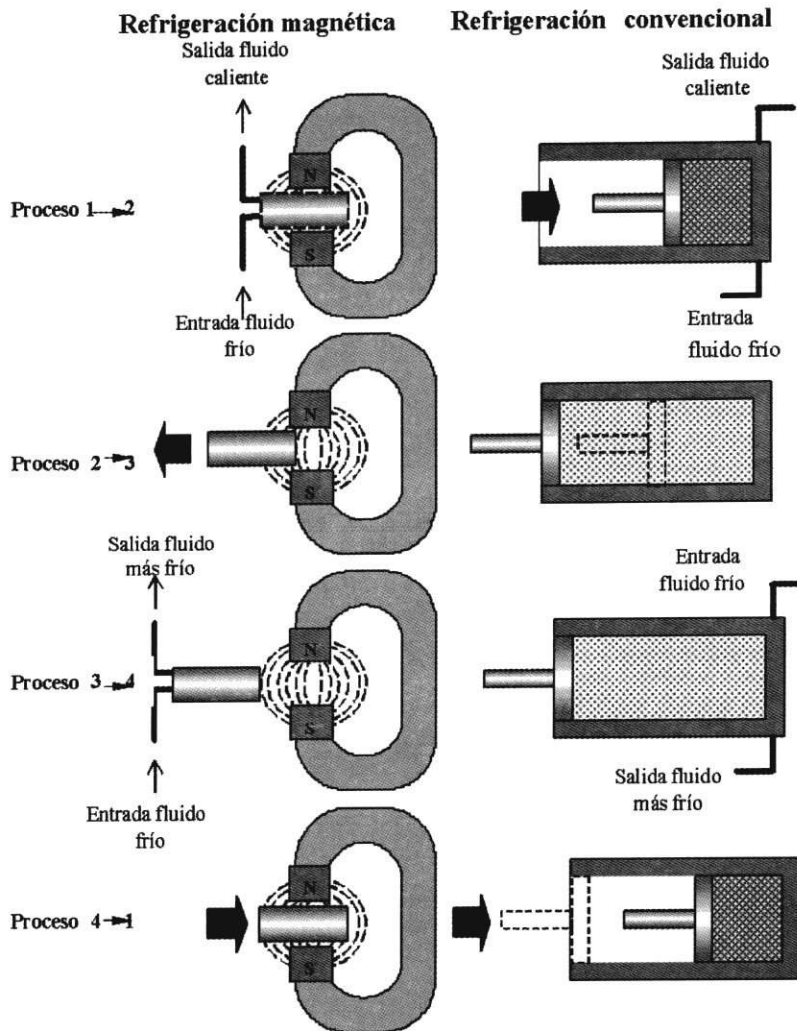


Figura 4 Esquema comparativo del ciclo de refrigeración magnética y el ciclo de refrigeración convencional



- Proceso 1 → 2 (corresponde al proceso de compresión isotérmica en el ciclo de Carnot): El material magnético se somete a un campo magnético fuerte, lo que produce una liberación de energía, que es absorbida por el fluido de intercambio, y la temperatura se mantiene constante.
- Proceso 2 → 3 (corresponde al proceso de expansión adiabática en el ciclo de Carnot): Se reduce el campo magnético aplicado al material, y se produce una disminución de la temperatura del material magnético, el cual se encuentra aislado térmicamente.
- Proceso 3 → 4 (corresponde al proceso de absorción de calor a temperatura constante en el ciclo de Carnot): Se produce un intercambio de calor entre la fuente de calor y el material magnético (refrigeración). Además, simultáneamente, se elimina por completo el campo magnético aplicado. La temperatura permanece constante durante el proceso.
- Proceso 4 → 1 (corresponde al proceso de compresión adiabática reversible en el ciclo de Carnot): El material magnético se aísla térmicamente y el campo magnético se incrementa, la cual produce un aumento en la temperatura del sistema.

**Fluidos de intercambio**

El material magnetocalórico se debe someter a un proceso de intercambio de calor con un fluido determinado que a su vez absorbe calor de la

fuente de calor (a temperatura baja) y libera calor a un sumidero de calor a temperatura alta.

Dicho fluido de intercambio se debe seleccionar según la temperatura de operación. En la tabla 2 se presenta una lista de fluidos que se emplean en diversas aplicaciones [6].

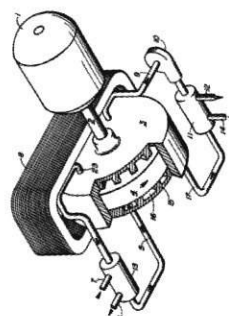
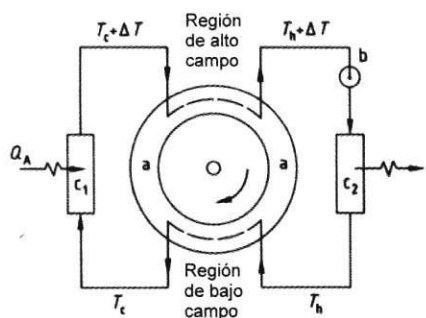
Cuando se emplea un gas, éste se debe presurizar hasta 10 atm aproximadamente, o la adecuada como para que dicho gas tenga una densidad suficientemente elevada y garantice una buena tasa de transferencia de calor.

**Ruedas magnéticas de refrigeración**

Las ruedas magnéticas son regeneradores que aplican el efecto magnetocalórico y constituyen una de las configuraciones más típicas en refrigeradores magnéticos. El esquema de una rueda magnética se puede apreciar en la figura 5 [18].

**Tabla 2** Fluidos de intercambio de calor

<b>Fluido</b>	<b>Rango de Temperatura</b>
Aleación líquida Na-K	261-400 K
Mezcla de agua – etanol (presurizada)	156-400 K
Propano (presurizado)	90-190 K
Nitrógeno (presurizado)	65-120 K
Neón (presurizado)	30-90 K
Hidrógeno (presurizado)	25-80 K
Helio (presurizado)	2-25 K



**Figura 5** Diagrama de una rueda de refrigeración magnética

En la rueda magnética, el fluido de intercambio entra a la rueda (a) en la región de bajo campo magnético a una temperatura  $T_h$  y es enfriado hasta  $T_l$  mediante el intercambio de calor con el material magnético. El fluido deja la rueda y fluye a través de un intercambiador de calor ( $c_1$ ) en el cual la carga de calor es absorbida. Luego, el fluido entra a la región de alto campo magnético a una temperatura  $T_c + \Delta T$ , donde  $\Delta T$  es el cambio de temperatura experimentado por el fluido debido al intercambio de calor. Más adelante, el fluido se calienta en la región de alto campo magnético hasta una temperatura de  $T_h + \Delta T$  por intercambio de calor con el material magnético. Finalmente, el fluido fluye a través de un intercambiador de calor ( $c_2$ ), en el cual se produce una liberación de calor y el fluido se enfría de nuevo a la temperatura  $T_h$ .

A manera de ilustración se presentan, en la tabla 3, algunos datos prácticos de una rueda magnética [18].

**Tabla 3** Datos típicos de un sistema de refrigeración magnética

<i>Variable</i>	<i>Valor</i>
Magnitud máx. del campo magnético	3 T
Diferencia de temperaturas	7 K
Carga térmica en el lado frío	500 W
Diámetro de la rueda	150 mm
Velocidad de rotación	6 rpm

### ***Ventajas y desventajas de la refrigeración magnética***

Los refrigeradores magnéticos tienen ventajas significativas con respecto a los sistemas de refrigeración convencionales. Algunas de ellas son:

- Seguridad para el medio ambiente. Ya que no emplean fluidos refrigerantes nocivos como los CFCs o HCFCs, sino fluidos limpios como el agua, no generan vapores que afecten la capa de ozono.
- Presentan mayor eficiencia termodinámica. Debido a que no emplean compresores, ni expansores, los procesos son termodinámicamente menos irreversibles y las pérdidas energéticas son muy bajas. Estos refrigeradores se pueden operar con una eficiencia entre el 60 y el 90% de la eficiencia de Carnot, en comparación con una eficiencia en promedio del 40% de los refrigeradores convencionales [19].
- Posibilidad de grandes intervalos de operación. El refrigerador puede llegar a operar entre 300 y 2 K, simplemente empleando diferentes materiales termocalóricos en serie.
- Versatilidad de operación. Si se requiere operar el refrigerador en un intervalo de temperaturas de operación diferente sólo es necesario cambiar el material termomagnético.
- Baja temperaturas de operación. Con este tipo de refrigerador se pueden obtener temperaturas de enfriamiento inferiores a 1 K, para aplicaciones de superconductividad.
- Bajos costos de operación. Debido a la elevada eficiencia termodinámica, los costos de operación son bastante bajos y pueden compensar los elevados costos de construcción.

Sin embargo, también presentan algunas desventajas, como:

- Se requieren elevados campos magnéticos (entre 6 y 9 Teslas) para una buena operación del equipo, lo cual se ha logrado tradicionalmente con bobinas magnéticas de elementos superconductores, las cuales son bastante costosas y de gran tamaño. Recientemente, se ha reportado la invención de un imán comercial que produce altos campos magnéticos y que se puede emplear en aplicaciones comunes [20].
- El elevado costo de los materiales magnetocalóricos (como las tierras raras), no por su escasez en la corteza terrestre, sino por su bajo nivel de explotación en el ámbito mundial.

Evidentemente, las ventajas de la refrigeración magnética son mayores que las desventajas y actualmente se están realizando investigaciones con objeto de reducir estas últimas.

### Aplicaciones de la refrigeración magnética

Hasta el momento los sistemas de refrigeración magnética han tenido aplicaciones limitadas a casos especiales, donde los ciclos de refrigeración convencionales son muy costosos o ineficientes. Los principales usos han sido:

- Sistemas de licuefacción de gases como nitrógeno, helio, oxígeno, argón o combustibles como propano, gas natural o hidrógeno. La licuefacción de este último es de gran interés debido a que es un combustible ambientalmente seguro y las reservas son ilimitadas [3].
- Sistemas de refrigeración criogénica muy importantes para aplicaciones basadas en el fenómeno de la superconductividad. Mediante este sistema se ha logrado alcanzar las temperaturas más bajas producidas hasta ahora artificialmente (inferiores a 1  $\mu$ K).
- Sistemas de refrigeración comerciales e industriales con elevados consumos energéticos, aplicaciones de procesamiento de alimentos, calentamiento y acondicionamiento de aire, destilación de licores y secado de granos.

Se espera que en aproximadamente quince años, el efecto magnetocalórico sea empleado en aplicaciones sencillas como refrigeradores domésticos o pequeños sistemas de aire acondicionado.

### Conclusión

La refrigeración magnética es una alternativa muy ventajosa comparada con los métodos convencionales de refrigeración, ya que se puede aplicar en casi todo el espectro de temperaturas con rendimientos de operación bastante altos. Aunque los materiales empleados como refrige-

rantes son costosos, se continúa avanzando en el desarrollo de nuevos compuestos que permitan la implementación de este sistema en aplicaciones comunes.

### Referencias bibliográficas

1. Alpert, Mark. "A Cool Idea". En: *Scientific America*. Vol. 278. No. 5. May, 1998. p. 44.
2. Karsjen, Steve. "Magnetic Refrigeration Makes a Cool Debut". En: *Advanced Materials & Processes*. Vol. 152. Jul., 1997.
3. Wu, Corina. "Magnetic Materials Keep Fridges Cool". En: *News*. Vol. 153. No. 123. Mar., 1998.
4. Asimov, Isaac. *Cronología de los Descubrimientos*. Barcelona. Ariel. 1997. pp. 600, 635.
5. Chilowsky, Constantin. "Method and Apparatus for Refrigeration". USP No. 2.589.775. Mar. 18, 1952.
6. Steyert, William Jr. "High Temperatura Refrigerator". USP No. 4.107.935. Aug. 22, 1978.
7. Barclay, John. "Wheel-Type Magnetic Refrigerator". USP No. 4.408.463. Oct. 11, 1983.
8. Kahn, David. "Magneto Caloric Cryogenic Refrigerator". USP No. 3.108.444. Oct. 29, 1963.
9. Van Geuns, Johannes Rudolphus. "Method and Apparatus for Producing Cold". USP No. 3.413.814. Dec. 3, 1968.
10. Steyert, William Jr. *et al.* "Continuous, Noncyclic Magnetic Refrigerator and Method". USP No. 4.033.734. Jul. 5, 1977.
11. Nakagone, Hideki *et al.* "Magnetic Refrigerator". USP No. 4.464.903. Ago. 14, 1984.
12. Nakagone, Hideki *et al.* "Magnetic Refrigerator". USP No. 4.509.334. Abr. 9, 1985.
13. Nakagone, Hideki *et al.* "Magnetic Refrigerator". USP No. 4.589.953. May. 20, 1986.
14. Barclay, John *et al.* "Magnetic Refrigeration Apparatus with Heat Pipes". USP No. 4.642.994. Feb. 17, 1987.
15. Barclay, John *et al.* "Magnetic Refrigeration Apparatus Conductive Heat Transfer". USP No. 4.702.090. Oct. 27, 1987.
16. Zimm, Carl *et al.* "Rotating Bed Magnetic Refrigeration Appartus". USP No. 2002/0053209 A1. May. 9, 2002.

17. Hayt, William. *Teoría Electromagnética*. 5.ª ed. México. McGraw-Hill. 1991.
18. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. 6<sup>th</sup> Ed. Wiley-VCH. 1999.
19. Ashley, Steven. "Fridge of the Future". En: *Mechanical Engineering*. Dec., 1994.
20. Weiss, Peter. "Magnetic Refrigerator Gets Down and Homey". En: *Science News*. Vol. 161. No. 1. Jan., 2002.