¿Qué podemos esperar de los superconductores de alta temperatura en los próximos años?

What can we expect from the high temperature superconductors in the next future?

Fernando Toral-Fernández
CIEMAT (España)

DOI: http://dx.doi.org/10.6036/9701

Es bien conocido que los materiales superconductores son aquellos que permiten el paso de la corriente eléctrica sin disipación de energía (obviando, en este primer momento, que existen unas ciertas pérdidas en el caso de una corriente alterna). Este fenómeno se descubrió en 1911, no por casualidad sino como consecuencia del éxito en la licuefacción del helio líquido, que permitió el estudio y caracterización de los materiales por debajo de 10 K de temperatura. Para que un material sea superconductor, su temperatura, densidad de corriente y campo magnético deben estar por debajo de unos valores denominados críticos. Dichos valores están relacionados entre ellos. Por ejemplo, un superconductor sólo lo será a su temperatura crítica si no circula corriente por él ni está sometido a un campo magnético. De otra manera, se reducirá la temperatura máxima a la que puede estar sometido para permanecer en estado superconductor. Hasta 1986 todos los materiales superconductores descubiertos tenían su temperatura crítica por debajo de 30 K. A partir de ese momento, se han ido descubriendo materiales con temperaturas críticas crecientes. Actualmente, un cuprato con mercurio, bario y calcio ostenta la máxima temperatura crítica, 133 K. Aplicando altas presiones, el valor de la temperatura crítica aumenta, pero su utilización en dispositivos prácticos se complica exponencialmente.

Del párrafo anterior, es fácil deducir que la historia de la superconductividad está íntimamente ligada a la capacidad de refrigeración, es decir, a la criogenia. La forma más sencilla de refrigeración de un dispositivo superconductor es su inmersión en un líquido criogénico, aunque actualmente la refrigeración basada en "cryocoolers" dificulta el diseño pero simplifica notablemente la operación. En sentido estricto, se consideran como superconductores de alta temperatura aquellos cuya temperatura crítica está por encima de la de licuefacción del nitrógeno líquido a presión atmosférica, es decir, 77 K, unos 200ºC bajo cero. Algunos autores consideran como superconductores de alta temperatura aquellos cuya temperatura crítica es superior a 30 K, pues el primer cuprato descubierto tiene unos 35 K como temperatura de transición. El autor prefiere utilizar el primer criterio, pues representa un verdadero cambio en las condiciones de utilización.

La mayoría de los superconductores de baja temperatura están sumergidos en un baño de helio líquido en condiciones de trabajo. Obviamente, la gran diferencia entre ambos tipos de superconductores viene dada por la eficiencia energética de los refrigerantes necesarios. Típicamente, la diferencia de rendimiento es superior a un factor 10 para las mencionadas temperaturas, que se puede considerar proporcional a los costes de operación asociados.

Ahora bien, una vez pasados treinta años de su descubrimiento, y teniendo en cuenta su potencial ventaja de eficiencia energética, puede sorprender que el uso de los superconductores de alta temperatura no se ha extendido, y sólo unas pocas aplicaciones los usan de forma habitual. En este artículo revisaremos las razones que explican esa situación y cuál es la tendencia más probable para los próximos años. No abordaremos la problemática del desarrollo de los propios materiales superconductores, que trasciende el objetivo de este artículo. Una visión general de los materiales superconductores y sus aplicaciones se puede encontrar en otros artículos de esta misma revista [1], [2].

1. USO PRÁCTICO DE SUPERCONDUCTORES DE ALTA TEMPERATURA

La principal ventaja de un dispositivo electromagnético superconductor respecto de su equivalente resistivo es la alta densidad de corriente, típicamente del orden de 50 a 100 veces superior. Este hecho implica una doble ventaja: la reducción de volumen y de costes operativos (electricidad) para la obtención de un campo magnético determinado. Evidentemente, desde sus inicios, el principal objetivo de los dispositivos superconductores está asociado a la creación de campos magnéticos elevados (más de 2 T).

A primera vista, los superconductores de alta temperatura crítica muestran valores del campo magnético crítico muy elevados, incluso de decenas de Tesla. Abren así el horizonte a aplicaciones donde los superconductores de baja temperatura, con menores valores de campo crítico, no podrían llegar nunca. Ahora bien, el rango de utilización real no es tan amplio, pues a partir de determinados valores combinados de campo magnético, densidad de corriente y temperatura, comienzan a producirse pérdidas, debido a inestabilidades en el anclaje de las líneas de campo magnético que los atraviesan [3]. Actualmente se está trabajando en la introducción de elementos de anclaje de las líneas de flujo durante el proceso de fabricación, pero el progreso es lento.

En todos los superconductores, tanto de baja como alta temperatura, ha sido necesario recorrer un largo camino para obtener cables de longitud suficiente para su utilización en aplicaciones electrotécnicas [4]. No es lo mismo conseguir unas buenas propiedades en una muestra de unos pocos centímetros que mantener dichas propiedades a lo largo de los cientos de metros que se necesitan para hacer una bobina para una aplicación real. En la mayoría de los casos, implica incluso un cambio en los procesos de producción, no solo una mejora de la homogeneidad de las propiedades.

Podríamos destacar los siguientes retos como los más significativos a la hora de fabricar cables superconductores de alta temperatura crítica para aplicaciones electrotécnicas:

a) Los superconductores de alta temperatura son muy anisotrópicos. La dependencia más estudiada es el valor de la corriente crítica en función de la dirección del campo magnético [5]. Por ello, un formato habitual de producción es en forma de cintas, donde las mejores propiedades se obtienen con un campo paralelo a sus caras. Ahora bien, esta geometría presenta muchas dificulta-

des para la fabricación de bobinas no planas, que son habituales en muchas máquinas eléctricas o en los imanes para aceleradores de partículas.

b) Los superconductores de alta temperatura son de tipo cerámico, lo que limita el radio de curvatura mínimo o las deformaciones sin degradación de sus propiedades. En algunos casos, se realiza el tratamiento térmico de sinterización una vez fabricada la bobina, de modo que ya tiene la geometría final [6]. En el caso de las cintas, se refuerzan normalmente con un sustrato con buenas propiedades mecánicas (por ejemplo, acero Hastelloy). Por otro lado, una clara desventaja es que el radio de curvatura de las cintas en su mismo plano es muy grande.

c) Como consecuencia de los dos puntos anteriores, los cables comerciales de superconductores de alta temperatura son capaces de transportar corrientes de trabajo moderadas, del orden de unos pocos de cientos de amperios. Cuando se quieren conseguir altos campos magnéticos en un volumen con aplicación práctica el número de amperios vuelta es muy elevado, del orden de cientos de miles. Para mantener unos valores razonables de autoinducción y, en consecuencia, limitar las sobretensiones cuando los superconductores transitan al estado resistivo (fenómeno conocido como quench), es conveniente utilizar corrientes de miles de amperios. Si los cables son redondos, la solución tradicional está basada en el trenzado de los mismos, formando los conocidos cables tipo Rutherford. Como la mayoría de los superconductores de alta temperatura se producen en forma de cinta, su agrupación resulta ser mucho más complicada. Las dos configuraciones que actualmente muestran más potencial de crecimiento son: la conocida como Roebel, inventada hace aproximadamente un siglo para conductores de cobre, donde se desperdicia la mitad del superconductor fabricado pero que muestra la ventaja de la reducción de las pérdidas inducidas por campos alternos, pues los conductores están transpuestos (Figura 1); y la denominada CORC, propiedad intelectual de Advanced Conductor Tecnologies, donde las cintas son arrolladas alrededor de un tubo, por lo que la densidad de corriente media se reduce.



Figura 1 Prototipo de cable superconductor de alta temperatura tipo Roebel (CERN, Juan Carlos Pérez)

Sólo hay tres tipos de superconductores de alta temperatura disponibles comercialmente, todos ellos son cupratos. Dos contienen bismuto, el Bi-2212 y el Bi-2223, y otro tierras raras, normalmente una combinación de itrio y gadolinio, denominado REBCO. Sólo el Bi-2212 está disponible en formato de cable redondo, el resto tienen forma de cinta. Actualmente, se está investigando en otra familia de superconductores de alta temperatura basados en hierro, cuyo primer miembro se descubrió en 2006. Se están empezando a hacer las primeras bobinas de muestra con cables todavía no disponibles comercialmente.

2. APLICACIONES DE LOS SUPERCONDUCTORES DE ALTA TEMPERATURA

Las aplicaciones de los superconductores de alta temperatura pueden ser agrupadas en dos categorías [7]: aquellas en las que sustituyen a los conductores convencionales y las que sólo son posibles gracias a sus peculiares propiedades, es decir, que son inaccesibles con conductores resistivos.

En la primera categoría, como sustitutos de los conductores resistivos, podemos distinguir:

1) Imanes de muy alto campo: incluimos en esta categoría los imanes para diagnóstico médico, resonancia nuclear, aceleradores de partículas e investigación de materiales. El valor del campo proporcionado por este tipo de imanes ha ido aumentando progresivamente, basado primero en NbTi, luego Nb_3Sn, y el siguiente paso debe estar basado en los superconductores de alta temperatura. En este tipo de aplicaciones se necesitan superconductores con alta densidad de corriente, lo que supone también unos esfuerzos mecánicos elevados. En ese aspecto, los mejores candidatos son los superconductores tipo REBCO, que son los que soportan más altos esfuerzos sobre todo en el caso de tener un sustrato de Hastelloy. Como tienen forma de cinta, se adaptan fácilmente en el caso de un solenoide, que es la geometría habitual para imanes de alto campo salvo en el caso de los aceleradores de partículas. En éstos, los imanes más habituales son del tipo coseno theta, basados en bobinas curvas. Se está trabajando en soluciones alternativas, como es el caso del proyecto Feather2 [8], donde se está fabricando un dipolo con cables tipo Roebel.

2) Aplicaciones de potencia [9]: en los últimos años ha habido numerosos proyectos dirigidos a hacer líneas de transmisión o máquinas eléctricas (transformadores, generadores). Las líneas de transmisión puestas en marcha son más bien demostradores, con una longitud media de unos cientos de metros. Las ventajas potenciales son una menor necesidad de espacio, menor impacto visual o menores pérdidas, sobre todo en países de temperaturas elevadas o donde las distancias a recorrer son elevadas [10]. En cuanto a las máquinas eléctricas, podemos destacar el proyecto Ecoswing, cuyo resultado más destacable es que una turbina eólica se conectó a la red durante 650 horas mediante un generador fabricado con superconductores de alta temperatura.

3) Imanes para reactores de fusión: actualmente, podemos distinguir dos tendencias. La primera está basada en bobinas de grandes dimensiones, donde el plasma se ubica relativamente lejos de las bobinas. En este caso, no hay problemas de espacio, y los superconductores de alta temperatura se pueden usar a conveniencia. La segunda, que persigue una reducción del coste, principalmente basado en la fabricación de componentes de dimensiones moderadas en una factoría, necesita bobinas de menor tamaño pero con mayor densidad de corriente y capaces de crear campos magnéticos más elevados. Esta segunda opción se está desarrollando mediante iniciativa privada, tanto por el MIT como por Tokamak Energy.

En la segunda categoría, debido a sus particulares propiedades, tenemos:

1) Tomas de alimentación: los superconductores de alta temperatura son los candidatos ideales para esta aplicación, pues permiten el paso de la corriente eléctrica sin disipación a la vez que tienen la baja conductividad térmica propia de las cerámicas. Además, el campo magnético es bajo, del orden de décimas de Tesla. Ya se utilizó este tipo de tomas de alimentación para los imanes del LHC, y se utilizan desde entonces de forma habitual siempre que las corrientes de alimentación son elevadas, típicamente por encima de 500 A.

2) Limitadores de corriente: estos dispositivos son capaces de limitar la corriente en caso de falta, siendo transparentes en condiciones normales de operación. Se han hecho numerosos prototipos, para diversos valores de tensión, hasta un máximo de 220 kV. Actualmente, varias compañías los ofrecen en su catálogo para redes de media tensión: Nexans, Siemens y Applied Materials. Existe aún una cierta reticencia a su implantación por parte de las compañías eléctricas, por lo que las empresas que los desarrollan están haciendo ensayos de larga duración para demostrar su fiabilidad.

3) Almacenamiento de energía: principalmente en forma de solenoides, destacando su alta eficiencia de conversión energéti-

ca, por lo que son especialmente adecuados para intercambiar altas potencias. En los últimos años, destaca el desarrollo liderado por el laboratorio de Brookhaven, alcanzando un campo de 12.5 T para almacenar 425 kJ [11].

3. PERSPECTIVAS DE FUTURO PARA LOS SUPERCONDUCTORES DE ALTA TEMPERATURA

El lector puede deducir del apartado anterior que hay un buen número de potenciales aplicaciones de estos materiales. La principal limitación para que su uso no se haya extendido es claramente su coste. En algunos casos, los materiales de partida son caros, sobre todo la plata que se utiliza en la familia de los bismutos como matriz, pero la mayor parte del coste viene determinada por los procesos de producción.

Un conductor de cobre tiene un coste aproximado de 10 €/kg. Un cable superconductor de NbTi cuesta 100 €/kg, y uno de Nb_3Sn, 1000, siendo ambos superconductores de baja temperatura. En el caso de los superconductores de alta temperatura, su precio está alrededor de 10000 €/kg, siendo más baratos los basados en bismuto que los REBCO. Estas cifras son las que uno se espera para materiales obtenidos con métodos de producción tan sofisticados, y que justificarían su escasa implantación.

Ahora bien, qué sucede si calculamos el coste de los anteriores conductores eléctricos en €/kA·m, es decir, el coste por kA transportado por un conductor con una longitud de un metro. Un cable de cobre que transporte una densidad de corriente de 5 A/mm2 supone un coste aproximado de 20 €/kA·m. En el caso de los superconductores, no es fácil dar un único número, pues la capacidad de transporte de corriente depende del campo magnético y de la temperatura de operación, así como de los esfuerzos mecánicos en algunos de ellos. Asumiendo valores típicos de funcionamiento, podríamos asumir un coste de 1 €/kA·m para el cable de NbTi, 10 €/kA·m para el Nb_3Sn, 60 €/kA·m para el Bi-2212, 90 para el Bi-2223 y unos 200 para los REBCO. Es obvio que los superconductores de alta temperatura permiten unos campos magnéticos de trabajo inalcanzables para los otros superconductores, pero su coste es aún un orden de magnitud más elevado. Es lógico pensar que los costes de un material de reciente descubrimiento son inicialmente altos, pero en este caso no se están cumpliendo las previsiones de reducción de coste que se habían hecho en estos últimos años. ¿Cómo podemos entender esta situación?

Si miramos hacia atrás, podemos darnos cuenta que en los años 70, cuando se inició la producción de NbTi, el precio inicial era alrededor de 1000 €/kg (compensando la inflación). Cuando se empezó a utilizar de forma industrial para la fabricación de imanes para imagen médica por resonancia, su precio bajó rápidamente, tanto por el aumento del volumen de producción como por la competencia industrial. Hoy en día, la producción anual está alrededor de 4000 toneladas al año. En el caso del Nb_3Sn, la producción anual es mucho más baja, en torno a 10 toneladas anuales para equipos de resonancia magnética nuclear de alto campo, pero los medios de producción son los mismos que los utilizados para el NbTi. De este modo, ha sido posible la fabricación de 100 toneladas anuales entre 2010 y 2014 para las bobinas de ITER sin grandes inversiones industriales adicionales.

En el caso de los superconductores de alta temperatura aparecen nuevos materiales, cada vez con mejores propiedades, y la industria optimiza dentro de lo posible sus métodos de producción para reducir los costes. Ahora bien, al no existir una aplicación comercial, no se establece una producción de forma continua ni aumenta la demanda, por lo que las empresas finalmente detienen la producción, normalmente para comenzar con otro material o método que ofrezca mejores propiedades. En algunos casos, las empresas han llegado a cerrar ante la falta de viabilidad comercial.

En los próximos años se esperan progresos tanto en las propiedades como en el coste de producción sobre todo de los REBCO, pues la industria lleva menos tiempo trabajando en ellos que en la familia de los bismutos. Y también se esperan novedades en la familia basada en hierro, que han sido propuestos como candidatos para los imanes de un gran colisionador circular de partículas en China (proyecto Super Proton-Proton Collider). En cambio, nadie está seguro de encontrar una aplicación de uso generalizado para estos materiales, que sería la garantía para su viabilidad comercial, si bien el secreto puede estar en cambiar nuestra forma de pensar, pues prácticamente todos los prototipos y desarrollos realizados están influidos por lo conseguido con los superconductores de baja temperatura, cuyas propiedades son totalmente diferentes.

4. CONCLUSIONES

En este artículo se han revisado las principales ventajas e inconvenientes que presentan los superconductores de alta temperatura para su uso en aplicaciones electrotécnicas. Se han superado muchas de las dificultades que presentan para su uso en dispositivos de utilidad en una aplicación real, no a nivel de laboratorio. No ofrece discusión su capacidad para el ahorro de costes de operación comparados con los de baja temperatura, ni la mejora de sus propiedades en los últimos años. Sin embargo, su precio sigue siendo muy elevado. Sólo algunas aplicaciones singulares pueden permitirse sufragar su coste. En los próximos años se espera que sus propiedades mejoren aún más, o que incluso aparezcan nuevos materiales, pero parece muy difícil que se reduzca su precio sin la aparición de una aplicación comercial que extienda su uso o mantenga una demanda continuada que estimule los procesos industriales de producción.

REFERENCIAS

[1] G. Sarmiento, S. Sanz, et al. "La superconductividad y sus aplicaciones (parte 1)". DYNA. Marzo 2013. Vol. 88. pp.148-153.
[2] G. Sarmiento, S. Sanz, et al. "La superconductividad y sus aplicaciones (parte 2)". DYNA. Mayo 2013. Vol. 88. pp.272-279.
[3] A. Ballarino, "Prospects for the Use of HTS in High Field Magnets for Future Accelerator Facilities", CERN-ACC-2014-073.
[4] D. Uglietti, "A review of commercial high temperature superconducting materials for large magnets: from wires and tapes to cables and conductors", Supercond. Sci. Technol. 32 (2019) 053001 (29pp), DOI: https://doi.org/10.1088/1361-6668/ab06a2
[5] C. Senatore et al. "Field and temperature scaling of the critical current density in commercial REBCO coated conductors", Supercond. Sci. Technol. 29 014002, 2016, DOI: https://doi.org/10.1088/0953-2048/29/1/014002
[6] Shen, T., Bosque, E., Davis, D. et al. "Stable, predictable and training-free operation of superconducting Bi-2212 Rutherford cable racetrack coils at the wire current density of 1000 A/mm2". Sci Rep 9, 10170 (2019). https://doi.org/10.1038/s41598-019-46629-3
[7] M. Noe et al., "HTS Applications", Workshop on Accelerator Magnet Superconductors, Design and Optimization, CERN-2009-001, DOI: https://doi.org/ 10.5170/CERN-2009-001.94
[8] J. Van Nugteren, "High Temperature Superconductor Accelerator Magnets", CERN-THESIS-2016-142 ; ISBN-978-94-028-0403-4
[9] Editor Z. Melhem, "High Temperature Superconductors (HTS) for Energy Applications", Woodhead Publishing, ISBN-978-0-85709-012-6
[10] H. Thomas et al., "Superconducting transmission lines – Sustainable electric energy transfer with higher public acceptance?", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 55, March 2016, pp. 59-72, DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.041
[11] R. Gupta et al. "Design, Construction, and Testing of a Large-Aperture High-Field HTS SMES Coil", IEEE Trans. on Appl. Superconductivity, Vol. 26, No. 4, 2016, DOI: https://doi.org/ 10.1109/TASC.2016.2517404

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece de forma especial la ayuda de Daniel Schoerling y Juan Carlos Pérez (CERN) para la elaboración de este artículo.