

LECCIÓN MAGISTRAL

Los Nuevos
materiales:
Una mirada
hacia el futuro

por

FLAVIANO GARCÍA ALVARADO
PROFESOR AGREGADO DE
QUÍMICA INORGÁNICA Y MATERIALES
UNIVERSIDAD SAN PABLO - CEU

LOS NUEVOS
MATERIALES:
UNA MIRADA
HACIA EL FUTURO

Excelentísimo Señor Secretario de Estado de Justicia
Excelentísimo Señor Canciller de la Universidad
Excelentísimo y Magnífico Señor Rector
Excelentísimas Autoridades
Ilustre Claustro Académico
Señoras y Señores:

Con mis primeras palabras quiero expresar mi agradecimiento al Ilmo. Sr. D. Andrés Gutiérrez Gómez, Decano de la Facultad a la que corresponde este año el turno y el honor de abrir con una lección el curso académico, por haberme propuesto para pronunciar la lección inaugural del curso 2000-2001. Espero cumplir esta misión con la dignidad que la Facultad de Ciencias Experimentales merece, y contribuir desde este estrado a la solemnidad del acto que marca, un año más, el encuentro de profesores y alumnos de la Universidad San Pablo CEU.

Antes de adentrarme en el tema objeto de la Lección debo decir que aceptar el encargo fue fácil, pues sin duda todo profesor tiene una tendencia irrefrenable a transmitir sus conocimientos. No podría encontrar, pues, mejor modo de iniciar un nuevo curso académico. Y es así un honor hablarles de los Nuevos Materiales, y lanzar una mirada hacia algunos de los avances tecnológicos que disfrutaremos en un futuro más o menos próximo.

Sobre el concepto de Material

Existen numerosas definiciones que, como siempre, procuran encerrar un amplio concepto con unas cuantas palabras. No caeré, por tanto, en la tentación de citar uno tras otro a los profesores y hombres de ciencia que lo han intentado. Me limitaré en cambio a la definición que por breve y general nada puede dejar fuera. Consideremos así que un material no es más que un "sólido útil"¹, y comprenderemos rápidamente que, con tan escueta definición, me estoy refiriendo a los componentes de una multitud de productos, artefactos e ingenios que nos rodean silenciosamente día a día. El filamento de volframio que, por incandescencia en su bulbo de cristal, hace desaparecer la oscuridad, los halofosfatos de metales alcalinos dopados con tierras raras que impregnan los tubos fluorescentes y que nos permiten disponer de una luz blanca que intenta imitar a la luz del sol, el imán permanente de samario y cobalto que permite el funcionamiento continuo de nuestros relojes electrónicos, los haluros de plata que impregnan las películas fotográficas, el nylon de nuestra ropa, los pigmentos que dan color a las pinturas, y como no citar finalmente a los materiales que han ido progresivamente uniéndose al hombre para contribuir al florecimiento de nuestra civilización: la madera, el hierro, el acero, el papel, el cemento y hormigón, el ladrillo y el aluminio fueron también, en su momento, nuevos materiales.

No puede haber duda alguna en que los materiales han sido nuestros compañeros de viaje, y así en la época actual el reconocimiento a estos sólidos no puede ser más alto puesto que las distintas épocas de la historia han sido bautizadas según la tecnología del material que, como fuerza impulsora, colaboró en el progreso del hombre. Me estoy

¹ M.A. Alario Franco, Los Nuevos Materiales. Revista Complutense (1987).

refiriendo a la Edad de Piedra, la Edad de Bronce y la Edad de Hierro. ¿En que Edad nos encontramos actualmente?. No creo ser el más indicado para bautizar la presente Edad del Hombre, ya que para ello sería necesario acotar temporalmente el período y analizar los cambios habidos en él. Pero, tan solo en los últimos cien años se han vivido cambios tan profundos en el mundo tecnológico que, quién sabe qué nuevos materiales aparecerán en los próximos siglos. No obstante, si tuviese que elegir un nombre siguiendo una nomenclatura similar a la ya establecida, y con el único conocimiento, nunca completo, de lo acontecido en los últimos siglos, la bautizaría como la Edad del Silicio rechazando tajantemente la tan extendida denominación de Edad de la Tecnología porque al fin y al cabo tecnología fue también el uso que de la piedra, del bronce y del hierro se hizo en sus respectivas edades.

Tendré varias ocasiones más adelante para referirme al Silicio, material funcional, que a la vez, ¡viva la simpleza!, es elemento químico. Pero a nadie debe extrañar mi elección. Si existe una revolución tecnológica propia del siglo XX, ésta es la de la computación y las telecomunicaciones, cuyos logros más altos son fruto de la fabricación de circuitos integrados a partir del semiconductor silicio y otros materiales relacionados con él.

Materiales para la Industria Electrónica

Aunque la obtención de silicio en el estado ultrapuro, necesario para la industria microelectrónica, se ha alcanzado este siglo, este elemento es uno de los constituyentes mayoritarios, el segundo, de la corteza terrestre. Y con él empezaré a mirar hacia el futuro de los nuevos materiales. Lamentablemente no tendré ni el tiempo ni el espacio suficiente para dedicar unas pocas palabras a cada uno de los diferentes materiales que existen. Me limitaré a desglosar las aplicaciones y ca-

racterísticas de no más de una decena, pidiendo desde aquí mis disculpas por los varios centenares que no serán citados.

El silicio, elemento número catorce, permaneció oculto a los afanes de los químicos hasta 1823, cuando Berzelius consiguió aislarlo por reducción de una de sus sales (K_2SiF_6) con potasio fundido². Pero no por ello el hombre se privó de utilizar materiales que contuvieran silicio. El sílex, usado hace unos 500.000 años para producir la chispa que proporcionaría el fuego protector, y las puntas de flecha y lanzas con las que nos convertiríamos en cazadores más eficaces, no es más que óxido de silicio. De igual forma, la industria de la cerámica se ha surtido desde los tiempos más remotos de minerales que los químicos inorgánicos denominamos silicatos, como la arcilla, los feldespatos o las micas, en los que el silicio y el oxígeno son los componentes fundamentales de ordenamientos tridimensionales ciertamente complejos. Estos minerales son, en la actualidad, la base de una floreciente industria de cerámicas avanzadas que son ampliamente usadas para la elaboración, por ejemplo, de piezas de gran tenacidad y resistencia térmica³. Más sofisticado es, no obstante, el uso actual que se hace del elemento silicio. Esta especie química es obtenida a escala industrial con una pureza extrema, y no por su facilidad de refinado, sino porque la presencia de impurezas altera notablemente las propiedades de las que hacemos uso. Y es que el silicio presenta en su forma tipo diamante la propiedad de ser semiconductor, y, como tal, su conductividad electrónica aumenta si así lo hace la temperatura, aunque a 25°C su conductividad es muy baja ($10^{-2} \text{ ohm}^{-1} \text{ cm}^{-1}$).

El ordenamiento tridimensional de átomos de silicio, que resulta estable a temperatura ambiente, es el que corresponde a la estructura tipo diamante y es, en parte, responsable de su estructura electrónica (ver Figura 1) que se caracteriza por la existencia de una banda de valencia

² N. N. Greenwood y A. Earnshaw, en «Chemistry of the Elements», Cap. 9. Pergamon Press, Oxford 1984.

³ W. F. Smith, en «Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales». 2ª Ed. McGraw Hill, Madrid 1993.

completamente llena y una banda de conducción vacía separadas una energía de 1,1 eV⁴.

Cuando el silicio es impurificado de forma controlada con pequeñas cantidades de otro elemento, proceso conocido como dopado, la conductividad se incrementa en varios ordenes de magnitud. Ahora denominamos al silicio como semiconductor extrínseco, y el valor exacto de la conductividad puede ser controlado de forma muy precisa mediante una elección apropiada de la concentración de dopante, de tal forma que podemos fabricar materiales semiconductores a medida. La naturaleza del dopante es también importante, ya que si se dopa con un elemento del grupo 15, como por ejemplo fósforo, arsénico o antimonio, cada átomo de dopante introduce un electrón en un nivel de energía próximo a la banda de conducción (ver Figura 1b). Estos electrones pueden ser térmicamente excitados a la banda de conducción y, en presencia de un campo eléctrico, se produce el movimiento de los electrones excitados a través del sólido, en otras palabras conduce la electricidad. Se dice entonces, que el silicio dopado de esta forma es un semiconductor tipo n. Por otro lado si el dopado se realiza con un elemento del grupo 13, como por ejemplo boro, aluminio o galio, éstos introducen niveles de energía vacíos (ver Figura 1c), que pueden, por tanto, aceptar electrones que provengan de la banda de valencia si estos son excitados adecuadamente. Ahora el material dopado se denomina semiconductor tipo p, puesto que la corriente es producida por el movimiento de huecos positivos de la banda de valencia.

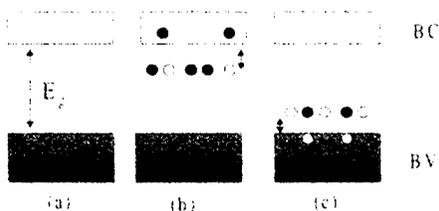


Figura 1.- Diagrama de bandas de a) Silicio puro, b) Silicio tipo n y c) silicio tipo p.

⁴ A. R. West en "Solid State Chemistry and its applications", John Wiley & Sons, Chichester 1984.

Lo que realmente convirtió al silicio en un nuevo material a los ojos de este siglo, es precisamente la impurificación controlada con fósforo, arsénico o antimonio para conseguir un semiconductor tipo n; y con boro, aluminio o galio para producir un semiconductor tipo p. Y así, cuando dos piezas de semiconductor tipo n se encuentran separadas por una fina capa de semiconductor tipo p el conjunto puede usarse como un amplificador triódico. El conjunto n-p-n es conocido actualmente como transistor. Su descubrimiento en 1947 les valió a los investigadores J. Bardeen, W.H. Brattain y W. Shockley el premio Nobel de Física en 1956.

La utilidad del transistor radica en que, en función del signo de la corriente aplicada a la capa intermedia de silicio tipo p, el transistor deja pasar, o no, una corriente a través de él. Abierto y cerrado son dos estados con los que puede construirse el código binario, de unos y ceros, que constituyen el lenguaje de los ordenadores. En realidad, el dispositivo en el que se fundamenta toda nuestra actual tecnología digital de ordenadores comerciales es el circuito integrado, un diminuto cuadrado de diez micrómetros de lado que alberga millones de transistores. Es posiblemente el artefacto más complejo jamás creado por el hombre⁵. Su inventor Robert Noyce lo desarrolló en 1958, y posteriormente fundaría, en unión de Gordon Moore, la compañía Intel Corporation.

Existe otra maravilla tecnológica que ha contribuido también al desarrollo de los modernos ordenadores y, por tanto, a todo lo que de ellos se ha derivado. Es la unidad de disco rígido, que nos ha proporcionado una forma eficaz y barata de almacenar los datos generados en un ordenador y consultarlos posteriormente con rapidez. Me estoy refiriendo a los conocidos popularmente como discos duros de ordenador. Cons-

⁵ C. R. Barret, Investigación y Ciencia, Junio 1999, pag. 40

tan de varios discos planos, formados por un sustrato de aluminio o vidrio recubiertos con un material magnético⁶, que giran a varios miles de revoluciones por minuto accionados por un motor eléctrico. La capacidad de la unidad de disco es función del número de platos y, por supuesto, del material magnético empleado para el recubrimiento.

En realidad todas las sustancias, sean gaseosas, líquidas o sólidas son afectadas por la presencia de campos magnéticos si bien, por lo general, la interacción de atracción o repulsión hacia estos campos suele ser muy poco intensa. Pero en los sólidos, dada la mayor proximidad de los átomos que lo constituyen, pueden tener lugar fenómenos cooperativos de tal forma que los efectos sobre cada átomo se sumen. Este fenómeno, conocido como ferromagnetismo, da lugar a los materiales magnéticos más interesantes por su amplio uso en dispositivos de memoria. De hecho, el uso de materiales magnéticos para el almacenamiento de información no es exclusivo de los actuales ordenadores. Las tan conocidas cintas de audio y de vídeo operan bajo un esquema idéntico que se basa en la fuerte interacción que existe entre un material, normalmente ferromagnético, y un campo magnético externo.

A modo de ejemplo, describiré brevemente como se produce la grabación de sonido en una cinta plástica en la que se ha depositado polvo de un material magnético, como puede ser el dióxido de cromo con morfología acicular⁷. Todo empieza en el receptor del sonido, el micrófono. Las ondas sonoras golpean una membrana situada en él y las vibraciones producidas hacen que dicha membrana entre o salga en un campo magnético con una frecuencia relacionada con la del sonido que se está recibiendo. Esto genera, en una bobina situada en la membrana,

⁶ J. W. Toigo, *Investigación y Ciencia*, Julio 2000, pag. 23

⁷ L. Smart y E. Moore, en «*Solid State Chemistry, An Introduction*», Cap. 7, pag. 248. Chapman and Hall, Londres 1992.

una corriente eléctrica fluctuante que es conducida hacia la cabeza de grabación donde una nueva bobina magnetiza un núcleo de hierro, material ferromagnético que genera un campo magnético que, en función de su intensidad y orientación, magnetiza las partículas de dióxido de cromo que van pasando a medida que la cinta va avanzando. Esto constituye un registro de un sonido y para escucharle basta invertir el proceso. En general, ya se trate de una cinta de audio, de vídeo o de una memoria física, en el momento de la lectura o recuperación de la información se genera una señal eléctrica que, una vez amplificadas, activa un altavoz, un monitor de televisión o una unidad de procesado dependiendo del dispositivo de que se trate⁸.

La capacidad de almacenamiento en registro magnético para sistemas de audio y vídeo no ha experimentado, comparativamente, un avance tan sorprendente como el de los discos rígidos de ordenador, los cuales crecieron en capacidad a un ritmo de un 25 o 30% anual entre 1980 y 1990, siendo el crecimiento durante la última década cercano al 60%. En el año 1999 el crecimiento alcanzó el 130%, y en la actualidad, la capacidad se duplica cada nueve meses. Este vertiginoso ritmo de crecimiento tiene en parte su origen en que, cada vez, se utiliza la magnetización de un menor número de partículas para el registro de un bit. Sin embargo, cuanto más corto es el bit, esto es, cuantos más bits pueden ser almacenados en un menor espacio, más susceptible es la partícula magnética a ser afectada por la temperatura y por las partículas vecinas también magnetizadas. Este efecto, conocido como efecto superparamagnético, podría hacer que, aunque en la actualidad se puedan almacenar 10 gigabits por cada 6,25 cm², en los próximos cinco años la técnica de almacenamiento actual en disco magnético alcance su límite.

⁸ R. Valenzuela, en «Magnetic Ceramics», Cap. 5, pag. 203. Cambridge University Press. Cambridge 1994.

Se han propuesto algunas soluciones para evitar el colapso del crecimiento de la capacidad de almacenamiento pero, en cualquier caso, habrá que encontrar nuevos materiales magnéticos que permitan obtener dispositivos con una mayor resistencia al borrado térmico, si bien esto obligará a que el grabado de datos tenga que realizarse a alta temperatura, lo cuál añade una mayor complejidad al sistema de almacenamiento. En esta línea se han empezado a estudiar los llamados materiales magnéticos duros, como son, por ejemplo, algunas aleaciones de hierro y platino o de samario y cobalto, que darán lugar próximamente a lo que ya se conoce como discos magneto-ópticos. En estos dispositivos se hace necesario, antes de proceder a la grabación, calentar el material magnético lo que puede ser llevado a cabo muy eficazmente con el uso de una fuente de luz láser. Las unidades podrán entonces almacenar unas cien veces más información que las usadas en la actualidad. Pero si miramos a las perspectivas puestas unos años más allá, y si la compañía Hewlett Packard tiene éxito, dispondremos de sistemas de almacenamiento con resolución atómica gracias al uso de materiales que, en función de la temperatura, transforman de una fase amorfa a otra cristalina y viceversa, aunque esto no pueda ser ya considerado como registro magnético. Como tampoco lo es una de las vías que la compañía IBM está siguiendo para evitar el problema superparamagnético. En este caso, los datos se almacenan realizando pequeñas hendiduras sobre una superficie plana de material polimérico. Las marcas sobre el plástico las realiza una aguja muy fina de silicio, de unos 20mm de radio, que recuerda, de no ser por su muy pequeño tamaño, a la aguja que sobre los surcos de un disco giratorio de polivinilo constituyó el ya casi olvidado "tocadiscos".

Podría también referirme ahora a otras tendencias nuevas en el almacenamiento de información como, por ejemplo, el uso de cristales holográficos, nanomateriales, etc..., Pero creo que con lo desarrollado hasta ahora queda puesto de manifiesto que los nuevos materiales se

están poniendo a disposición de la tecnología de la información para evitar el escandaloso colapso que se prevé en los próximos años.

Materiales Fotónicos

Hasta el momento presente, la tecnología de la información tiene su origen en el transporte de electrones a través de materiales conductores electrónicos en los que la conductividad eléctrica, y su variación, provienen de la existencia en los sólidos de un ordenamiento periódico de átomos que es, a su vez, consecuencia de la naturaleza química y proporción de sus constituyentes. Pero una nueva tecnología, que se fundamenta en la transmisión de luz, ha hecho su aparición recientemente. Si en vez de transportar electrones a través de hilos conductores, se envía luz a través de un material dieléctrico la información contenida viaja más deprisa, y la cantidad de información por segundo supera en varios ordenes de magnitud a la que se alcanza con el transporte de electrones. La partícula asociada a la luz se denomina fotón, y estos interaccionan entre sí menos fuertemente que los electrones, por lo que las pérdidas de energía durante la transmisión serían menores. No debe, por tanto, extrañarnos que las redes que operan bajo este concepto, conocidas como redes de fibra óptica, vayan siendo cada vez más amplias. Así, por ejemplo, si una llamada telefónica se envía a través de un cable de fibra óptica como una serie de pulsos de luz, la intensidad, el tiempo entre los pulsos y la duración del pulso se pueden modificar adecuadamente para codificar el contenido del mensaje o comunicación. Por otro lado, resulta mucho más difícil interceptar y descifrar una señal enviada a través de fibra óptica. Con el objeto de transmitir la información a distancias del orden de kilómetros se hace necesario que la intensidad de la luz se mantenga, y es por eso que la mayor parte de las investigacio-

nes en este campo se encuentran dirigidas a la reducción de pérdidas de energía⁹.

El primer requisito para evitar las pérdidas es, por supuesto, que la luz se mantenga dentro del cable o fibra. Puesto que la luz láser diverge mucho menos que la luz convencional, actualmente se están usando, como fuentes de luz, láseres semiconductores, como por ejemplo el de AsGa. Aún así todavía el haz de luz presenta un cierta tendencia a escapar de la fibra, por lo que se hace necesario un diseño optimizado de ésta que consiste en dotarla de un índice de refracción variable desde la superficie al interior. El haz se envía así a través del centro de la fibra, la región con mayor índice de refracción, y puesto que las zonas circundantes presentan un menor índice de refracción, reflejan hacia el interior cualquier haz que se desvíe de la trayectoria fijada por el centro del cable de igual forma que lo haría un espejo. Una tercera fuente de pérdidas es la absorción de luz por el vidrio, que constituye la fibra óptica. Es fácil entender el problema si se piensa en la maravillosa transparencia que tiene un cristal de una ventana de unos cuantos milímetros de espesor. Si miráramos el cristal a través del canto la transparencia de este cristal, ahora de varias decenas de centímetros de grosor, se perdería y en su lugar se observaría una tonalidad verdosa que proviene de la absorción de luz por los iones Fe^{2+} presentes en el cristal. El problema es tan importante, que si el cristal usado para fabricar la fibra contiene como impureza un ión de Fe^{2+} , por cada diez mil millones de átomos, un haz de luz en el infrarrojo cercano que recorriera 3 Km de fibra perdería la mitad de su intensidad. Por ello, es importante que los materiales usados para la fabricación de fibras sean de una pureza extraordinaria. Esta es una de las razones por las que el óxido de silicio es

⁹ L. Smart y E. Moore, en «Solid State Chemistry, An Introduction», Cap. 6, pag. 227. Chapman and Hall, Londres 1992.

uno de los materiales más empleados, ya que se puede obtener con un bajo coste a partir de tetracloruro de silicio, compuesto que en su momento fue desarrollado por la industria de semiconductores para la obtención de silicio ultrapuro.

Aunque las pérdidas de energía en las fibras comerciales siguen existiendo, se han conseguido reducir hasta el extremo de hacerlas rentables para el transporte de información a distancia de unos cuantos kilómetros. La curvatura que se le da a las instalaciones de este tipo suele ser muy baja, ya que si es demasiado cerrada se producen pérdidas significativas de luz. Esta simple limitación resulta crucial para el futuro de las instalaciones de fibra óptica, ya que no podremos utilizarlas para sustituir a los conductores de la industria microelectrónica, que son obligados continuamente a realizar cambios bruscos de dirección. Parece, pues, que el circuito integrado no se encuentra al alcance de la fibra óptica, y así el futuro radicaría en sistemas mixtos que usen transistores y circuitos integrados electrónicos, como los que están siendo usados actualmente, combinados con sistemas ópticos para la transmisión a larga distancia.

Sin embargo, y de nuevo, el desarrollo de materiales avanzados, como son los materiales fotónicos¹⁰, puede cambiar el rumbo de este futuro dirigiéndolo hacia una tecnología de la información fundamentada en circuitos integrados ópticos.

El desarrollo de los materiales fotónicos se inicia en el año 1987¹¹ a partir de una idea que resulta aún más grandiosa por su simplicidad.

¹⁰ J. D. Joannopoulos, P. R. Villeneuve y S. Fan, *Nature* **386**, 143 (1997)

J. Joannopoulos, R. Meade y J. Winn, en «Photonic Crystals». Princeton Press, Princeton 1995.

¹¹ E. Yablonovitch, *Phys. Rev. Lett* **58**, 2059 (1987)

S. John, *Phys. Rev. Lett.* **58**, 2486 (1987)

Si la transmisión de electrones es permitida en un material electrónico en función de su periodicidad cristalina, esto es, según el tipo de ordenamiento espacial que poseen los átomos que lo forman, podría hacerse lo mismo en la transmisión de fotones si se diseñan materiales con una variación periódica de la constante dieléctrica. De esta forma, se consiguen materiales que prohíben el paso de luz de determinadas frecuencias a través de él. Sin embargo, la introducción de ciertas imperfecciones en la periodicidad del material puede llevar a que fotones de una determinada energía queden atrapados en ellas, y si el defecto o imperfección se propaga en una dirección el fotón solo podría moverse en la misma dirección. El defecto lineal actúa, por tanto, como lo haría un cable de cobre frente a una corriente de electrones. Se crea así una guía de luz de la cuál los fotones nunca podrán escapar porque las regiones de material que le rodean están prohibidas. Ya no importa que durante la transmisión giremos 90°, si la guía gira los fotones también lo harán.

La flexibilidad para cambiar la dimensionalidad, la periodicidad, y la dirección de los defectos creados a voluntad hacen que los materiales fotónicos permitan el diseño de nuevos tipos de filtros, láseres y diodos emisores de luz¹².

Es posible que estos nuevos materiales nos obliguen en un futuro no muy lejano a olvidarnos de la palabra microelectrónica, para aprender una nueva: microfotónica. En cualquier caso la futura competición entre luz y electrones será reñida. Otro nuevo tipo de materiales, que paso a describir, puede hacer resurgir el interés por la electrónica. Son los nanomateriales.

¹² R. Slusher, *Opt. Photonics News* 4, 8 (1993)
R. Meade *et al.*, *J. Appl. Phys.* 75, 4753 (1994)

Nanomateriales

La mayor parte de las propiedades que hacen útiles a muchos de los tipos de sólidos conocidos provienen de la presencia de un elevado número de átomos iones o moléculas ordenados en el espacio. Así, por ejemplo, el comportamiento magnético de una pieza de hierro tipo α de unos 56 g de peso proviene de la existencia de cerca de un billón de billones de átomos de hierro ordenados según una celdilla cúbica centrada en el cuerpo. Del mismo modo, ese elevado número de átomos, pero de silicio, y ordenados según la estructura tipo diamante, está presente en un cristal semiconductor de silicio de unos 28 g. Teóricamente, un cristal de hierro o silicio que fuera infinito tendría las mismas propiedades que las piezas a las que acabo de hacer referencia. No obstante, no puede decirse lo mismo cuando avanzamos hacia el otro extremo. Las propiedades de un material pueden cambiar drásticamente cuando el diámetro de la partícula, su tamaño de grano, el espesor de la lámina o la anchura del cable conductor, según sea el caso, es del orden de 10^{-9} m. Esta pequeñez aconseja usar la escala de los nanómetros (1nm equivale a 10^{-9} m). Estos materiales que en composición no difieren de sus homólogos de “mayor tamaño” se conocen como Nanomateriales¹³, y están constituidos por un número muy pequeño de átomos, iones o moléculas. Sin embargo, tal y como Feynman planteara en 1960, “Hay un montón de espacio en lo pequeño”, y así, por ejemplo, si un bit de información pudiese ser almacenado usando partículas que contuvieran tan solo unos 100 átomos, entonces todos los libros hasta ahora escritos podrían ser almacenados en un volumen correspondiente a un cubo de medio milímetro de lado¹⁴. No ha habido que esperar mucho. En 1990 ya se había conseguido escribir bits de información en dos dimensiones

¹³ A. S. Edelstein y R.C. Cammarata en “Nanomaterials, Synthesis, Properties and Applications”. Ed. por A. S. Edelstein y R.C. Cammarata. Institute of Physics Publishing, Londres 1996.

¹⁴ R. P. Feynman, Eng. Sci. **23**, 22 (1960); reimpresso em 1992 J. Micromech. Systems **1**, 60.

usando incluso menos de 100 átomos¹⁵, gracias al empleo de la Microscopía de Barrido de Efecto Túnel. Es posible que tardemos todavía algunos años más en hacer viable económicamente estos dispositivos¹⁶, así que aguardaremos impacientes hasta que podamos disponer de nuestro pequeño gran cubo de información.

Debemos empezar a hacer uso de un tipo de materiales que la naturaleza ha estado empleando durante millones de años, y es que según las palabras de Dominic Dickson “La vida misma puede ser considerada como un sistema nanofásico”¹⁷. Así, por ejemplo, una clase de proteínas, conocidas como ferritinas se encuentran en organismos variados, desde bacterias al hombre, donde son responsables de un sistema mediante el cual los organismos vivos pueden sintetizar y usar oxihidróxido y oxifosfatos de hierro, con tamaño de partícula de tan solo 64 nm, y cuyas funciones biológicas incluyen el almacenamiento y transporte de hierro en el organismo. Por otro lado, puede citarse la existencia de nanopartículas de magnetita (Fe_3O_4) de unos 40 a 100 nm, con un solo dominio magnético, en los magnetosomas de un cierto tipo de bacteria, las magnetotáticas, que las confiere la habilidad de, usando el campo magnético terrestre, y su interacción con la magnetita, dirigir su movimiento en la dirección donde se encuentran los nutrientes o gradientes químicos correspondientes. El papel de la nanopartícula es esencial, si fuera más grande la magnetita formaría dominios magnéticos perdiéndose el elevado valor de magnetización del material, por lo que puede decirse que las bacterias magnetotáticas han producido una nanoestructura

¹⁵ D.M. Eigler, E.K. Schweizer, *Nature* **334**, 524 (1990)

¹⁶ K. E. Drexler, en “Nanosystems: Molecular Machinery, Manufacturing and Computation”. Wiley, New York 1992.

M. Krummenacker y J. Lewis (Ed), “Prospects in Nanotechnology Proc. 1st Gen. Conf. On Nanotechnology: Development, Applications, and Opportunities”, Wiley, New York 1995.

¹⁷ E. A. Dobisz, F.A. Buot, C.R.K. Marrian en “Nanomaterials, Synthesis, Properties and Applications”. Cap. 20, pag. 497. Ed. por A. S. Edelstein y R.C. Cammarata. Institute of Physics Publishing, Londres 1996.

con propiedades óptimas. En principio, estas bacterias se podrían utilizar como fuente biológica de pequeñas partículas magnéticas de una calidad mucho mayor que las que podemos preparar, hasta ahora, artificialmente, si bien su uso quedaría limitado a aquellas aplicaciones que no requieran una cantidad demasiado elevada. Dado el gran volumen de ventas de ordenadores no parece aconsejable extraer el material de registro magnético de tan diminutos organismos.

La extraordinaria capacidad de orientación de cierta clase de aves, como las palomas, es debida también a la presencia de magnetita en su organismo, si bien la mayor complejidad del mismo ha hecho que no se disponga de información tan precisa como para el caso de las bacterias.

Existen también algunos casos bien estudiados en los que se han encontrado nanomateriales que cumplen funciones estructurales como, por ejemplo el de algunos moluscos marinos, como las lapas, que poseen dientes que usan para rascar las algas adheridas a las rocas, y cuyo excesivo desgaste es compensado por un proceso continuo de biomineralización de goetita, un oxihidróxido de hierro (α -FeOOH). El tejido biológico en el que se produce el crecimiento de los cristales inorgánicos provoca que éste se realice en forma de agujas largas de no más de 20 nm de anchura y alineadas entre sí en la dirección de crecimiento del diente, lo que refuerza las propiedades mecánicas de éste.

Hay que decir que el campo de los nanomateriales biológicos se encuentra en su infancia, por lo que hay muchas y excitantes posibilidades para el futuro tanto en lo que respecta al uso de los propios materiales producidos por organismos vivos como en la fuente de inspiración para la búsqueda de nuevas rutas de síntesis a escala industrial.

Con modelos biológicos o sin ellos, los esfuerzos actuales para la fabricación de nanomateriales con muy diversas propiedades, mecáni-

cas, ópticas, eléctricas, magnéticas, etc., es un campo de frenética actividad investigadora. Así, por ejemplo, la nanoelectrónica, desarrollada a partir de nanodispositivos abrirá nuevos desafíos para la tecnología actual, que probablemente desembocarán en la fabricación de superordenadores en un simple chip¹⁸

Materiales y Energía

Permítaseme ahora cambiar el rumbo hacia otro aspecto que preocupa a la Sociedad, y en el que también los nuevos materiales tienen algo que aportar.

Si un eficaz transporte y almacenamiento de la información resulta crucial para el desarrollo de nuestra tecnología, no lo es menos la generación, el transporte y el almacenamiento de energía. Son tantos los tipos de materiales que, antes o después, tendrán su protagonismo en futuros desarrollos tecnológicos relacionados con la energía, que no me será posible ni siquiera nombrarlos. Me limitaré, por tanto, a relatarles las características de algunos de ellos, y en buena lógica me referiré a aquellos que mejor conozco y puedan resultar, a la vez, de interés más general.

A pesar de la amplia variedad de recursos energéticos que pueden extraerse de nuestro planeta, la madera, el carbón y los derivados de petróleo han acompañado casi en exclusividad los avances del hombre, debido a que su simple combustión proporciona una energía de bajo coste. Las nuevas tecnologías no van a dejar salir indemnes a estos viejos compañeros de viaje, que hemos explotado casi hasta hacerlos

¹⁸ E. A. Dobisz, F.A. Buot, C.R.K. Marrian en "Nanomaterials, Synthesis, Properties and Applications". Cap. 20, pag. 497. Ed. por A. S. Edelstein y R.C. Cammarata. Institute of Physics Publishing, Londres 1996.

desaparecer. Actualmente el 39% de la energía primaria consumida proviene del petróleo, el 25% del carbón y el 21% del gas natural, lo que significa que el 85% de toda la energía mundial proviene de combustibles fósiles¹⁹. En cualquier caso, aunque estos recursos fueran ilimitados, el uso intensivo ha planteado problemas de contaminación que solo muy recientemente han comenzado a ser abordados de una manera científica. Los resultados, sin caer en el catastrofismo, han de ser analizados con seriedad ya que ha sido contrastada la amenaza que representan los gases producidos en la combustión. Por citar algún ejemplo recordaré que los óxidos de nitrógeno, producidos por los motores de combustión representan un riesgo para la salud de los habitantes de las grandes ciudades, además de contribuir, en unión de otros contaminantes, a la destrucción del escudo que nos protege de la radiación ultravioleta de alta energía y que se conoce como capa de ozono. El gas que se produce en mayor cantidad durante la combustión de nuestras fuentes de energía más comunes, el dióxido de carbono, aún siendo no tóxico para el hombre, se convierte en un peligro al ser señalado como uno de los posibles causantes del efecto invernadero, el cual origina el calentamiento progresivo de la tierra teniendo así fuerte influencia en el cambio climático a nivel mundial.

Nos enfrentamos pues a una situación en la que debemos dar solución simultánea a tres aspectos: asegurar nuestros recursos y fuentes de energía, mantener el crecimiento económico y preservar el entorno natural²⁰. Aunque una primera medida es la de hacer un uso más racional y eficaz de los combustibles fósiles, no creo que exista duda alguna en que no debemos tardar en abandonar el uso casi en exclusividad que de ellos hacemos. Las alternativas son muchas, y algunas de ellas han

¹⁹ Energy Information Administration, International Energy Annual 1996, DOE/EIA-0219 (1998).

²⁰ S. Oda, K. Ishihara, J. Power Sources 68 , 3 (1997).

mostrado su eficacia a pequeña y media escala. Las más atractivas, conocidas genéricamente como energías renovables, incluyen la geotérmica, la solar y la eólica todas ellas capaces de generar energía eléctrica de forma indefinida.

El estado actual de desarrollo de las energías renovables citadas permite albergar esperanzas en cuanto a su pronta expansión. No obstante, hay que tener en cuenta que, en algunos casos, la naturaleza de la fuente de energía confiere un carácter intermitente y así, por ejemplo, solo podremos convertir energía solar en energía eléctrica durante los períodos diurnos, siendo precisamente en los períodos nocturnos cuando la demanda, al menos para uso doméstico, puede resultar más elevada. Se hará necesario, pues, el empleo de acumuladores de energía eléctrica que aseguren el suministro, aún cuando la generación de energía no se esté llevando a cabo.

Baterías Recargables

Para solucionar el problema del almacenamiento de energía eléctrica, nada más directo que utilizar dicha energía para provocar una reacción química que no se daría sin dicho aporte energético, e invertir la reacción cuando sea necesario para así liberar de nuevo la energía puesta en juego en la reacción. He descrito sucintamente la esencia del acumulador electroquímico conocido como batería recargable.

Estamos bastante familiarizados con este tipo de dispositivos, y aunque las baterías no recargables que suministran energía a la mayoría de nuestros pequeños aparatos electrónicos, son las más ampliamente comercializadas, el extensivo, y a veces abusivo, uso de la nueva electrónica portátil (teléfonos, ordenadores o cámaras de vídeo) ha hecho

también populares a las baterías recargables, sin olvidar, por supuesto, la gran utilidad que una batería de este tipo, conocida como ácido-plomo, tiene en los vehículos automóviles.

Aunque muy útiles, las baterías recargables actuales son claramente mejorables. Los usuarios de teléfonos móviles y ordenadores portátiles han aprendido rápidamente que la batería se agota demasiado pronto, y hay que recargarla, por tanto, demasiado a menudo. Menos evidente es la deficiencia de la batería ácido-plomo empleada en la industria automovilística, pero basta levantarla de su sitio para comprobar su gran peso, ¡Y eso que solo se la utiliza para el arranque y la iluminación del vehículo! Si se pretendiera usar esta batería, además, para el sistema de tracción su tamaño y peso sería mucho más elevado, y parte de la energía acumulada en ellas se utilizaría para transportar en el vehículo la propia batería, por lo que la autonomía de viaje quedaría bastante mermada. Por otro lado, existe otro aspecto que no hay que olvidar, el alto poder contaminante y tóxico que poseen los elementos que se emplean para su fabricación.

La apuesta de futuro parecen ser las baterías de alta densidad de energía, capaces de almacenar una gran cantidad de energía en un volumen reducido y de poca masa. Es precisamente en el desarrollo de estos necesarios acumuladores donde la Química de Materiales se está mostrando muy activa en la búsqueda de nuevos componentes. Uno de los avances más importantes se produjo con la comercialización, hace unos nueve años, de una batería recargable de ion litio. El origen de este tipo de batería hay que buscarlo veinte años atrás, cuando se propone que si se construye una célula electroquímica usando litio metal como electrodo negativo y ciertos óxidos de metales de transición como electrodo positivo, se podrían obtener baterías recargables con un potencial o voltaje

de salida muy elevado, y capaces de almacenar una gran cantidad de electricidad²¹. Para ello es necesario que el compuesto que actúa como electrodo positivo sea capaz de reaccionar, intercalando y desintercalando iones litio, de forma reversible. Esta configuración se conoce como batería de litio, y en su versión no recargable, éste es cuando la reacción química que se produce no es reversible, se lleva usando más de veinte años para alimentar calculadoras, relojes, marcapasos, etc. Son las conocidas pilas tipo botón. Por el contrario, la versión recargable presenta ciertos problemas de ciclabilidad que surgen como consecuencia de la presencia de litio metal, y que pueden desembocar en la explosión de la batería. El problema fue resuelto sustituyendo el litio metal por otro material que fuera capaz de intercalar y desintercalar iones litio a potenciales bajos. Aunque la penalización por esta sustitución es una disminución de la energía que la batería es capaz de almacenar, hizo posible el desarrollo a escala industrial, y así, a principios del año 1991, la compañía Sony comercializó la primera batería de este tipo que se conoce como “batería de ion litio” y que, en el modelo concreto de Sony, alberga en su interior un óxido de litio y cobalto (LiCoO_2) como electrodo positivo y carbón (coque o grafito) como electrodo negativo. Existen, no obstante, varios materiales que están siendo utilizados en la actualidad por otras compañías y centros de investigación para el desarrollo y comercialización de baterías recargables de litio (LiMn_2O_4 , SnO , etc.)²², y otros muchos que

²¹ La energía almacenada en una célula electroquímica por unidad de masa se conoce con energía específica. En una primera aproximación se puede estimar como el producto del voltaje por la capacidad específica (cantidad de electricidad por unidad de masa), de tal forma que cuanto mayores sean estos dos factores mayor será la energía que puede almacenar la batería.

²² R. J. Gummov, A. de Kock, M.M. Thackeray, *Solid State Ionics* **69**, 59 (1994).

J.M. Tarascon, W.R. McKinnon, F. Coowar, T.N. Bowmer, G. Amatucci, y D. Guyomard. *J. Electrochem. Soc.* **141**, 1421 (1994).

M. Broussely, *J. Power Sources* **81-82**, 137 (1999).

Fujifilm, Internet: http://www.fujifilm.co.jp/eng/news_00m079.htm, 1996.

Y. Idota *et al.*, *Science* **276**, 1395 (1997).

C. Julien y G.A. Nazri en “Solid State Batteries: Materials Design and Optimization”. Kluwer Academic Publishers, Norwell 1994.

R. A. Huggins, *J. Power Sources* **81-82**, 13 (1999).

se encuentran en fase de estudio a escala de laboratorio²³. En la Figura 2 se presenta el esquema de una batería de ion litio y una breve indicación de su funcionamiento.

Más recientemente, se han comercializado también baterías recargables que llevan litio metálico y que proporcionan densidades de energía más altas. La solución para su desarrollo industrial ha venido del uso de un material polimérico conductor de iones litio, que bloquea el crecimiento dendrítico del litio evitando así que, tras un funcionamiento prolongado, el litio reaccione directamente y de forma violenta con el electrodo positivo. El nombre que ha recibido este tipo de batería es el de "litio polimérica", y ha sido la opción empleada por la compañía Ericsson para alimentar sus últimos diseños de teléfonos móviles de muy reducido tamaño.

No cabe duda que el uso de cualquiera de estos tipos de batería, la de ion litio o la litio polimérica, que almacenan entre dos y tres veces más energía que las clásicas de ácido plomo, proporcionan una mayor autonomía a la electrónica portátil. Precisamente la mayor autonomía de estas baterías unida a una larga vida media de funcionamiento, así como su buen comportamiento a temperaturas tan bajas como treinta grados bajo cero, han llevado a la NASA a usar en su programa de exploración del planeta Marte, baterías de este tipo que alimentarán sofisticados y

²³ F. García Alvarado y J.M. Tarascon, U.S. Patent 5,225,297, (1993).

B.B. Owens, W.H. Smyrl, J.J. Xu, *J. Power Sources* **81-82**, 150 (1999)

H.Kawai, M.Nagata, H. Tukamoto y A.R. West, *J. Power Sources* **81-82**, 67 (1999).

F. García-Alvarado, J.M. Tarascon y B. Wilkens, *J. Electrochem. Soc.* **139**, 11 (1992).

S. Denis, E. Baudrin, F. Orsini, G. Ouvrad, M. Toubol y J.M. Tarascon, *J. Power Sources* **81-82**, 79 (1999).

C. Julien y G.A. Nazri en "Solid State Batteries: Materials Design and Optimization". Kluwer Academic Publishers. Norwell 1994.

costosos sistemas electrónicos²⁴. Por otro lado, el reducido espacio que ocupan dada su alta densidad de energía es otra ventaja a considerar cuando se trata de transportar un equipo a distancias tan lejanas. Por ejemplo, una reducción de 200 kg conlleva un ahorro de unos 30 millones de dólares en la

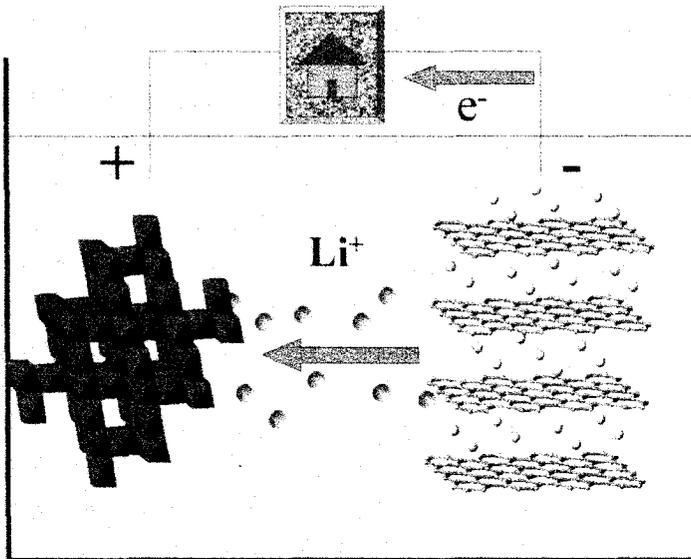


Figura 2.- Esquema de una batería de ión litio. Consta de dos electrodos, uno positivo y el otro negativo, inmersos en un conductor iónico de litio. En el esquema mostrado la configuración es (-)Li_xC₆/Electrolito/λ-MnO₂ (+), y corresponde a la etapa de descarga de la batería. Los iones litio salen de Li_xC₆ y emigran a través de electrolito para insertarse en λ-MnO₂. Los electrones, producidos en la oxidación del Li_xC₆, circulan por el circuito externo con lo que se consigue una corriente eléctrica espontánea que puede realizar un trabajo. Cuando el proceso se ha completado la batería presenta la siguiente configuración:

(-) C/Electrolito/LiMn₂O₄. Puede ahora iniciarse la etapa de recarga que devuelve el sistema a la situación inicial al producirse los procesos inversos.

²⁴ C. Marsh, R. Gitzendanner, F. Puglia, J. Byers, "Advance Li-Ion Technology for the MSP01 Mars Lander". 10^a International Meeting on Lithium Batteries. Abstract n° 351. Como, Italy. Mayo-Junio 2000.

lanzadera que ha de poner en rumbo al vehículo de exploración²⁵. Cuando el próximo año 2001 la nave de exploración MSP01 Mars Lander comience su viaje hacia el planeta rojo, hemos de recordar que su corazón estará compuesto por una batería de ion litio, y si esta no falla lo mismo ocurrirá en las futuras misiones programadas para los años 2003, 2005 y 2007.

La sustitución de las baterías no recargables que actualmente se implantan como fuente de alimentación de los dispositivos cardíacos denominados marcapasos, constituye otra nueva e interesante aplicación. De esta forma, podría evitarse la intervención quirúrgica destinada a sustituir la batería, también de litio, pero no recargable, que suele tener lugar entre los ocho y diez años del implante. Si se usa el nuevo tipo de baterías al que me estoy refiriendo el precio a pagar sería el de recargar periódicamente la batería, quizás a través de terminales transcutáneos. Esta aplicación sería inviable si la frecuencia de la recarga fuera similar a la de las baterías de un teléfono móvil, casi diaria. Pero una batería de alta densidad de energía podría dar a un dispositivo biomédico de bajo consumo energético una autonomía de varios meses. Es cuestión por tanto de sopesar las ventajas e inconvenientes de una operación quirúrgica de envergadura frente a la molestia de la recarga periódica.

Otros desarrollos médicos implantables como son el corazón artificial o los dispositivos de asistencia ventricular (LVAD), necesitan mucha más potencia para funcionar por lo que, en estos casos, se hace necesario alimentarlos mediante baterías de ion litio externas, si bien para permitir una cierta autonomía al enfermo respecto al paquete de

²⁵ B.V. Ratnakumar, M.C. Smart, C.K. Huang, D. Perrone, S. Surampudi y S.G. Greenbaum, *Electrochimica Acta* **45**, 1513 (2000).

pilas, los dispositivos suelen ir dotados de una batería recargable interna²⁶. Parece que cuando se piensa en alojar una batería en el interior del cuerpo humano se comprende mejor la necesidad de almacenar mucha energía en el menor espacio posible.

El desarrollo de baterías de litio o de ion litio de gran tamaño podría en un futuro próximo proporcionarnos un medio eficaz de almacenar energía eléctrica proveniente de fuentes de energía renovables, como la solar o la eólica. Espero que en unos años, no me atrevere a decir cuantos, dispongamos de paneles fotovoltaicos en nuestros tejados y de baterías recargables de litio, como un electrodoméstico más, que nos proporcionen la energía eléctrica suficiente como para, en la medida de lo posible, eliminar de nuestro entorno las contaminantes centrales térmicas y las siempre polémicas centrales nucleares.

Los futuros desarrollos tecnológicos y la búsqueda de nuevos materiales que actúen como electrodos en baterías de litio se están dirigiendo también a la sustitución del motor de combustión interna de los vehículos automóviles por motores eléctricos. Para alcanzar este logro, cuyo impacto social sería muy alto, debe superarse una importante limitación. La escasa potencia de las baterías de litio no permiten mover eficaz y rentablemente un automóvil, y puesto que, la potencia está relacionada con la rapidez con la que puede producirse una reacción de intercalación en un material, debemos encontrar nuevos materiales electródicos que posean una cinética de intercalación rápida. No albergó demasiadas esperanzas al respecto, puesto que, la reacción de intercalación implica el movimiento de iones, Li^+ , en el interior de un sólido y

²⁶ C. F. Holmes, "The Role of Lithium Batteries in Modern Health Care". 10th International Meeting on Lithium Batteries. Abstract n° 48. Como, Italy. Mayo-Junio 2000.

C. F. Holmes, R. A. Leising, D.M. Spillman y E. Takeuchi, Batteries for Biomedical Implantable Devices, ITE Battery Letters 1, 132 (1999).

éste es, siempre, intrínsecamente lento. A pesar de ello, la búsqueda de nuevos materiales y diseños que permitan obtener una alta potencia no ha sido ni mucho menos descuidada, y así son numerosos los grupos de investigación, sobre todo japoneses, que han mostrado resultados prometedores en los últimos Congresos que se han dedicado exclusivamente a baterías de litio²⁷.

Pilas de Combustible

Si se tiene en cuenta que tras un aumento del 30% respecto a 1986, en 1996 circulaban por el mundo unos 630 millones de vehículos que emitieron un total de 3700 millones de toneladas de dióxido de carbono, sería una tremenda irresponsabilidad no plantear otros desarrollos destinados a la eliminación de los problemas originados por el uso de combustibles derivados del petróleo. Es posible que los intereses económicos y geopolíticos hayan privado a nuestras ciudades de un entorno más limpio y saludable, pero el deterioro ambiental ha pasado a ser una preocupación generalizada en nuestra sociedad, y ésto ha de marcar el principio del fin de las emisiones masivas de contaminación provenientes de la generación de energía.

²⁷ K. Tamura y T. Horiba, *Journal of Power Sources* **81-82**, 156 (1999).

T. Iwahori, Y. Ozaki, A. Funahashi, H. Momose, I. Mitsubishi, S. Shiraga, S. Yoshitake y H. Awata, *J. Power Sources* **81-82** 872 (1999)

M. Corbett, " Opportunities for Lithium Batteries in Electric Vehicle and Hybrid Electric Vehicles Applications". 10th International Meeting on Lithium Batteries. Abstract n° 327. Como, Italy. Mayo-Junio 2000.

T. oriba, K. Hironaka, T. Matsumura, T. Kai, M. Koseki y Y. Muranaka, " Manganese Type Lithium Ion Battery for Pure and Hybrid Electric Vehicles". 10th International Meeting on Lithium Batteries. Abstract n° 354. Como, Italy. Mayo-Junio 2000.

G. A. Nazri, " Status of Lithium Batteries for Electric-Based Transportation". 10th International Meeting on Lithium Batteries. Abstract n° 355. Como, Italy. Mayo-Junio 2000.

En esta mirada hacia el futuro que hoy lanzamos he propuesto las baterías recargables, y a los materiales en ellas implicados, como indispensables colaboradores en la implantación de algunas fuentes de energía alternativa, pero ante el motor de explosión las baterías recargables parecen rendirse. Otra alternativa electroquímica, las Células o Pilas de Combustible pueden dar cuenta de él, si bien el éxito de estas pilas frente al motor de explosión dependerá en cierta medida de la obtención de algunos nuevos materiales.

La primera pila de combustible fue descubierta a mediados del siglo XIX por el notable jurista y físico Sir William Grove²⁸, el cuál demostró que la unión por vía electroquímica de hidrógeno y oxígeno genera electricidad. Pero fue a partir de 1930 cuando los estudios de estos sistemas llevaron al primer prototipo industrial en el año 1953²⁹. Posteriormente, la utilización de estas pilas para alimentar de energía eléctrica las naves espaciales de los proyectos Géminis y Apolo demostró la viabilidad del descubrimiento de Sir William Grove. Actualmente todos los vuelos espaciales tripulados van dotados con pilas de este tipo.

La pila de combustible, al igual que las baterías de litio, constan de un ánodo y un cátodo separados por un electrolito (ver Figura 3). Al inyectar hidrógeno en el ánodo se forman iones positivos, H^+ , que se mueven a través del electrolito hacia el cátodo, y se liberan electrones que circulan por el circuito externo generando una corriente eléctrica.

²⁸ W.R. Grove, *Phil. Mag.* **14**, 127 (1839); **15** 287 (1839).

W. R. Grove, *Phil. Mag.* **21**, 417 (1842).

²⁹ F.T. Bacon, *BEAMA Journal* **6**, 61 (1954).

Cuando éstos llegan al cátodo se combinan con los iones positivos y con oxígeno del aire, que ha sido inyectado en el cátodo, generando agua.

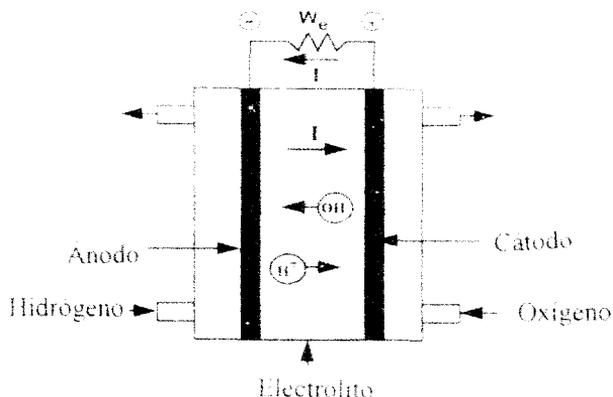


Figura 3.- Esquema de una pila de combustible con electrolito conductor iónico de protón. (Adaptado de C. Lamy *et al.* Journal de Physique, 1994).

Considerando que la reacción global se produce entre hidrógeno y oxígeno, la única emisión de este dispositivo es agua por lo que un vehículo dotado de pila de combustible tendría un nivel de emisión de contaminantes de cero. Del mismo modo, si la pila se utilizase para generar energía eléctrica a gran escala, en una central eléctrica, o dispersa en viviendas e industrias, su impacto ambiental sería nulo.

Existen varias configuraciones posibles de pilas de combustible, que son nombradas de acuerdo al tipo de electrolito que en ellas se emplea. Entre éstas cabe destacar la de membrana de intercambio de protones, la de ácido fosfórico, la de carbonato fundido y

la de cerámica de óxido sólido cuyas características se pueden encontrar en la tabla I.

Tabla I. Características y componentes de distintos tipos de pilas de combustible³⁰.

Tipo de Pila (Electrolito)	Membrana de intercambio de protones	Ácido fosfórico	Carbonato fundido	Cerámica óxido sólido
Temperatura de funcionamiento	80°C	~200°C	650°C	800-1000°C
Portador de carga H ⁺		H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ²⁻
Catalizador	Platino	Platino	Niquel	Perovskitas
Rendimiento	40-50%	40-50%	>60%	>60%
Estado de Desarrollo	50 kW demo 250 kW desarrollo	200 kW comercial 11 MW demo	2MW demo	100 kW demo

El estado de desarrollo de pilas de combustible para centrales eléctricas no es en la actualidad muy aceptable, ya que las que se han puesto en marcha en muy distintos países, a pesar de sus muy elevadas potencias teóricas, o no proporcionaron la potencia máxima, o nunca llegaron a funcionar como la denominada Mark-II, que intentó producir 4,5 MW en el distrito de Manhattan en Nueva York³¹; o su vida fue muy corta como las 23.000 horas que logró funcionar una unidad de 11 megawatios en Tokyo. Posiblemente ésta sea la causa por la que la tendencia actual es la de implantar unidades descentralizadas.

No existen actualmente diseños comerciales de turismos eléctricos con pilas de combustible, si bien son ya numerosos los prototipos

³⁰ A. C. Lloyd, Investigación y Ciencia, Septiembre 1999, pag. 60.

³¹ C. Lamy y J.M. Leger, Journal de Physique IV, C1-253 (1994).

avanzados que se han dado a conocer. El Austin A40, fabricado en 1966, fue uno de los primeros, aunque no resultó muy práctico, ya que las pilas ocupaban gran parte del espacio que debería estar destinado a los pasajeros. En la actualidad casi todos los grandes fabricantes han abordado el desarrollo de pilas de combustible para la automoción, y muy probablemente, el 2004 será el año del lanzamiento de esta nueva tecnología. Veremos así el Necar 4 de Daimler-Chrysler, o una versión del Renault Laguna e incluso un deportivo de Toyota³². En la actualidad todos ellos están ya autorizados para circular por autopista, aunque por el momento no hayan salido al mercado de vehículos nada más que algunos autobuses. Hay que tener en cuenta que uno de los problemas inmediatos al que se enfrentarían los atrevidos usuarios de estos vehículos sería encontrar una estación de servicio donde repostar hidrógeno.

Los problemas técnicos que habrán de resolverse antes de que se implanten de forma amplia el uso de estos vehículos son muchos y variados, por lo que si se me permite expresar una opinión muy personal, diré que la salida a la venta de estos vehículos en el año 2004 será en realidad el resultado de la competencia entre las distintas compañías, y su deseo de dar a conocer a los consumidores las bondades de sus respectivas tecnologías. Teniendo en cuenta que el secreto industrial al que están sujetos los diseños de estas compañías no permite conocer el estado actual de resolución de dichos problemas, me referiré ahora, tan solo, a algunos en los que los nuevos materiales tengan algo que aportar.

En primer lugar, hay que tener en cuenta que la reacción química que se lleva a cabo en una pila de combustible necesita ser acelerada por la presencia de un material electrocatalizador, papel que actualmente desarrolla el metal platino. La primera consecuencia es un incremento

³² A.J. Appleby, *Investigación y Ciencia*, Septiembre 1999, pag. 54.

notable del coste de producción, unas 1000 a 1200 pesetas por kilovatio si nos atenemos a los diseños más modernos. Lamentablemente, no se ha encontrado hasta la fecha ningún otro material que pueda sustituirle²², aunque en algunos de los distintos tipos de pilas de combustible que se encuentran en la etapa de demostración se usa níquel metálico o un óxido de calcio y titanio con estructura tipo perovskita y fórmula CaTiO_3 (ver Tabla I).

El segundo de los problemas apunta directamente a la esencia del dispositivo. El combustible utilizado, gas hidrógeno, es altamente inflamable, y, por tanto, peligroso. Si esto es un riesgo que podemos asumir en un viaje espacial, no será lo mismo cuando nuestras calles se inunden de automóviles cargados con bombonas de hidrógeno a presión. La alternativa que se ha empleado en muchos de los diseños industriales actuales es la de utilizar metanol u otro producto químico que, tras una oportuna reacción, genere hidrógeno in situ. La penalización es que, en estos casos, hay que usar todavía más platino para favorecer la formación de hidrógeno. Por otro lado los productos de la reacción envenenan el catalizador disminuyendo el rendimiento de la pila. El almacenamiento de hidrógeno de forma segura es una de las vías de investigación abiertas en este campo. De las distintas soluciones al problema, la utilización de hidruros metálicos ya ha sido probada con cierto éxito en los prototipos de Mazda y Toyota. El hidruro se forma sometiendo un determinado metal a una presión elevada de hidrógeno, lo que ocasiona que el metal, como si fuera una esponja, atrape átomos de hidrógeno en su estructura cristalina. Basta luego disminuir la presión exterior para que el metal libere el hidrógeno.

Otra solución más futurista sería el uso de hidrógeno metálico sólido estabilizado a temperatura ambiente, que podría irse transformando controladamente en hidrógeno gas. La idea es sencilla pero para obtener hidrógeno sólido metálico sería necesario comprimir el gas con

presiones superiores a la atmosférica en varios millones de veces, y aún así nada nos asegura que una vez retirada la alta presión, el hidrógeno no vuelva a su estado normal. Hasta el momento se han probado presiones cercanas a las existentes en el centro de la tierra, y no se ha logrado obtener este material³³. La preparación de este nuevo estado del hidrógeno no solo encontraría aplicación en los dispositivos que estamos tratando. Como breve apunte al respecto puede decirse que existen predicciones sobre la posible conductividad eléctrica con nula resistencia por parte de este sólido. Otros científicos imaginativos piensan que podría usarse como material de construcción, pues sería tres veces más ligero que el aluminio y unas diez veces más ligero que el hierro³⁴. En los supuestos más optimistas podríamos, incluso, utilizar el hidrógeno sólido para la construcción de automóviles más ligeros que obligatoriamente habrían de obtener un rendimiento más alto del combustible. En definitiva se trata de un impresionante sueño: vehículos de hidrógeno que se alimentan de hidrógeno.

Volviendo a los materiales implicados en el desarrollo actual de pilas de combustible, me resta referirme al que actúa como electrolito. Parece existir un amplio consenso en que un sólido permeable a los iones positivos H^+ , y conductor de ellos, es la solución más adecuada para vehículos de transporte. El dispositivo que, en este caso, hay que denominarlo Pila de Combustible de Membrana Intercambiadora de Protones gana el consenso de todos gracias a la compacidad que puede alcanzarse al estar todos los componentes en estado sólido, lo que por, otro lado, evitaría posibles derrames de líquido. El sólido conductor protónico debe tener un espesor de tan solo unas décimas de milímetro pues se requieren ensamblados de electrodos y electrolito con espesores totales de 0,3 a 0,5

³³ C. Narayan, H. Luo, J. Orloff y A. L. Ruoff, *Nature* **393**, 46 (1998).

³⁴ W.H. Nellis, *Investigación y Ciencia*, Julio 2000, pag. 48.

cm. Esta es, posiblemente, la causa por la que parte de las investigaciones se dirigen a materiales con buenas propiedades plásticas, como son los polímeros. Las membranas perfluorosulfonadas, como el Nafion 117 y la desarrollada por la compañía Dow Chemical, han sido ya utilizadas para la construcción de pilas que operan a la temperatura de 80°C y que, en 1993, fueron implantadas en un autobús de la ciudad de Vancouver (Canadá) que puede alcanzar los 70 km/h y 150 km de autonomía. No obstante, las membranas actuales sólo pueden ser usadas en pilas que se alimenten de hidrógeno. Así, si el problema de la forma de almacenamiento de este peligroso gas no llega a resolverse habrá que volver pensar en el uso de otros combustibles como metanol. Pero entonces se requerirán temperaturas de funcionamiento más altas, unos 130 °C, a las que las actuales membranas no son estables³⁵. Es por ello que debemos conseguir membranas más estables térmicamente. No hay que descartar que otro tipo de nuevos materiales, como las cerámicas conductoras por protones, puedan también ser utilizadas para la construcción de membranas. En este sentido, las investigaciones se dirigen a compuestos inorgánicos como el hidrogenosulfato de cesio³⁶ o algunos ceratos de bario³⁷ que, aunque presentan movilidades iónicas a temperaturas mucho más elevadas, podrían ser modificados para rebajar la temperatura de conducción.

Si las pilas de combustible están llamadas en un futuro no muy lejano a proporcionarnos medios de transporte no contaminantes, no es menos prometedor el uso que podría hacerse en cuanto al suministro descentralizado de energía eléctrica a viviendas y edificios. Una pila de combustible de solo 40 kW cubriría las necesidades de una vivienda

³⁵ K. Kreuer, *Chem. Mat.* **8**, 610 (1996)

³⁶ A.I. Barnov, L.A. Shuvalov, N.M. Schagina, *JETP Lett.* **36**, 459 (1982).

³⁷ H. Iwahara en "Proton conductors. Solids, Membranes and gels-materials and devices". Cap. 8. Ed. por P. Colomban. Cambridge University Press. Cambridge 1992.

grande o de un pequeño comercio, mientras que las unidades de varios cientos de kilovatios se implantarían en los edificios comerciales y grandes empresas. La estimación que se ha hecho indica que las ventas en los Estados Unidos en los años próximos al 2030, dirigidas a viviendas y pequeños negocios, podrían ascender a unos 7,5 billones de pesetas anuales³⁸

Ya hay varias compañías que suministran electricidad a casas piloto. En la ciudad de Nueva York se ha levantado un edificio en el nº 4 de Times Square dotado de dos pilas de combustible de 200 kW, que suministran agua caliente e iluminación para la fachada, además de servir como potencia de reserva ante posibles interrupciones del suministro eléctrico externo. Y en Albany, estado de Nueva York, se ha conseguido cubrir las necesidades de una vivienda unifamiliar con una unidad de membrana de intercambio de protones del tamaño de una lavadora. Algunas de estas implantaciones han resultado posibles gracias a las muy generosas subvenciones públicas ya que, siendo realista, hay que decir que el elevado coste limita actualmente su implantación a gran escala. Tengan en cuenta que 1kW proporcionado por una pila de combustible cuesta entre las 500.000 y 600.000 pesetas, frente a las 110.000 pesetas que cuesta el generado en la turbina de una central térmica corriente. Pero en un futuro menos inmediato, la preocupación por el cambio climático y la necesidad de llevar al mínimo las emisiones de dióxido de carbono favorecerán el uso de pilas de combustible. En este sentido, cabe destacar la iniciativa del Gobierno de los Estados Unidos por la que los compradores de pilas de combustibles para uso residencial pueden aspirar a una ayuda federal. Hace tan solo unos años se concedía únicamente por la compra de 100 o más kilovatios. Cuando uno piensa en el alto coste de nuevas tecnologías, quizás convenga recordar que los pri-

³⁸ A. C. Lloyd, Investigación y Ciencia, Septiembre 1999, pag. 60

meros automóviles que circulaban a principios del siglo XX por las empedradas calles de nuestras ciudades tenían también precios prohibitivos.

Materiales Superconductores

Resulta, en cierta forma, angustioso conocer el gran esfuerzo que la Ciencia y la Técnica dedican a la producción y almacenamiento de energía eléctrica, para luego tener que asumir que la forma en la que la transportamos produce pérdidas considerables. Los cables de una instalación o el tendido eléctrico para el transporte a más larga distancia están fabricados de metales, cuya propiedad característica es la de ofrecer una resistencia baja al paso de los electrones, pero no nula, por lo que la pérdida de energía por este motivo se estima entre un 5 y un 8%. El porcentaje es muy elevado si se tiene en cuenta el alto coste económico y medioambiental que su producción conlleva. La situación ideal se alcanzaría con la utilización de sistemas de transporte fabricados con materiales que posean resistencia eléctrica nula. Esta es precisamente una de las características que presentan algunos sólidos cuando son enfriados a muy bajas temperaturas, y que por ello son conocidos con el nombre de Materiales Superconductores.

La historia de estos materiales comienza en la ciudad de Leiden a principios de siglo. Allí, en el laboratorio de bajas temperaturas del Profesor Kammerlingh Onnes, se consiguió convertir el gas helio en líquido. El uso de helio líquido como refrigerante permitió estudiar las propiedades de la materia a temperaturas tan bajas como $269\text{ }^{\circ}\text{C}$ bajo cero. Uno de los primeros hallazgos tuvo lugar en el año 1911, cuando un estudiante de doctorado del Profesor Kammerlingh Onnes encontró que la resistencia eléctrica del mercurio se hace cero si se le somete a esta baja temperatura. En mayo de ese mismo año, Onnes presenta estos

resultados ante la Academia de Ciencias de Holanda³⁹, y poco más de un año después obtiene el Premio Nobel de Física. La temperatura a la cuál ocurre el fenómeno se conoce como Temperatura Crítica (T_c) y cuando el metal se enfría por debajo de ella se dice que pasa a un estado superconductor.

En 1913 el Profesor Kammerlingh Onnes realiza un nuevo descubrimiento relacionado la superconductividad. Cuando el plomo se encuentra en el estado superconductor, existe un valor de campo magnético que, sin necesidad de subir la temperatura, devuelve al plomo al estado normal resistivo. El fenómeno resulta ser general en todos los materiales superconductores. A este campo magnético se le conoce como Campo Crítico (H_c).

Otro descubrimiento en 1916 da nombre al tercer parámetro característico de los materiales superconductores. Aunque estos no ofrecen resistencia al paso de una corriente eléctrica, si la densidad de corriente alcanza un cierto valor, conocido como corriente crítica (J_c), el material vuelve al estado normal. Esto es consecuencia de que con toda corriente eléctrica va asociado un campo magnético. Si la densidad de corriente es muy grande puede, entonces, alcanzarse el valor crítico del campo magnético.

Desde 1916 y hasta 1973 se han ido descubriendo materiales superconductores con temperaturas críticas cada vez más elevadas⁴⁰, correspondiendo en esa fecha el valor más alto a los denominados compuestos A15, entre los que el Nb_3Ge , con una temperatura crítica de 250 °C bajo cero, es uno de los más estudiados. Es evidente que un

³⁹ H. Kammerlingh-Onnes, Akad. Van Wetenschappen, Proceedings from the section of Sciences (Amsterdam) **14** 113 y 818 (1911).

H. Kammerlingh-Onnes, Comm. Leiden **120b**, (1911).

⁴⁰ M. A. Alario y J.L. Vicent, en "Superconductividad". EUDEMA Universidad. Madrid 1991.

superconductor óptimo ha de tener valores altos de temperatura, campo y corriente críticas.

Como última característica destacable de los materiales superconductores, hay que indicar que son capaces de repeler los campos magnéticos, siempre que sean menores que el crítico, exhibiendo la propiedad del diamagnetismo perfecto. El hecho se conoce como efecto Meissner.

Examinemos ahora las aplicaciones de estos materiales, unas ya desarrolladas y otras en desarrollo, y comprobaremos que son muy variadas y extremadamente interesantes. Teniendo solo en consideración los materiales disponibles hasta 1973, a los que llamaremos superconductores clásicos, comencemos por la aplicación que parece más evidente y directa: la posibilidad de establecer líneas de transmisión de corriente eléctrica a larga distancia sin pérdida alguna. El único e importante problema es que deberíamos mantener los cables a temperaturas próximas a los 250 °C bajo cero, en el mejor de los casos, lo que hace totalmente inviable la aplicación usando superconductores clásicos. Pero la nula resistencia al paso de la corriente ha dado lugar a otra aplicación de alta importancia tecnológica, que consiste en el almacenamiento de energía en unidades supermagnéticas. Basta dejar circulando una corriente eléctrica, generada, por ejemplo, en momentos de baja demanda, para ser usada en el momento requerido sin que la resistencia del material, por no tenerla, haya producido pérdidas en la energía almacenada. Si no fuera porque los dispositivos de este tipo realizados con una aleación superconductora de niobio y titanio han de ser refrigerados mediante helio líquido, podríamos decir que estamos ante un serio competidor de las baterías recargables.

Como última aplicación relacionada con la nula resistencia eléctrica del estado superconductor hay que citar la producción de campos

magnéticos intensos. Si no se hiciera uso de los materiales superconductores, existen dos alternativas para la generación de campos magnéticos. La primera consiste en hacer pasar una densidad de corriente muy alta por un cable conductor, por ejemplo, de cobre, si bien las pérdidas por calentamiento del cable son muy grandes. La segunda alternativa es usar un electroimán, que consiste en enrollar el cable de cobre alrededor de un material magnético del tipo ferromagnético, y aunque es la solución más empleada, el campo máximo que puede generarse es como mucho de unos dos teslas, surgiendo esta limitación de las características del material magnético empleado. La solución aportada por los superconductores es la de pasar una corriente eléctrica por un cable superconductor, ya que al no oponer resistencia al paso de la corriente no provoca pérdidas de energía, y así sin gasto alguno de energía eléctrica, se pueden producir campos magnéticos de unos diez teslas. Comparemos esta situación con los mejores diseños que se conocen, sin recurrir a los superconductores, para los que se hace necesario el empleo de una potencia de 1,7 MW si se quieren obtener esos mismos diez teslas. La gran ventaja de lo que podríamos denominar “imanes superconductores” esta siendo explotada comercialmente, a pesar de tener la limitación del alto coste que conlleva la refrigeración del material. Estos poderosos imanes han encontrado su aplicación en áreas donde se hace totalmente imprescindible aplicar un campo magnético muy alto, y así se han mostrado especialmente útiles en la eliminación de impurezas magnéticas de alimentos y materias primas, así como en el desarrollo de los más modernos aparatos de Resonancia Magnética Nuclear. Además, cabe destacar su uso en investigación científica puntera como por ejemplo la obtención de imágenes de resonancia, que están teniendo un impacto sorprendente en la diagnosis médica.

El efecto Meissner, característico de los materiales superconductores, da lugar a una aplicación que es quizás la más conocida por su espectacularidad. Una pieza de material superconductor “le-

vita" sobre un imán (ver Figura 4), y de este hecho algunas compañías japonesas han pasado a desarrollar un tren que levita sobre vías construidas de material magnético. Los costes son cuantiosos de nuevo, aunque no solamente debido al sofisticado y caro sistema de enfriamiento, pero al no existir rozamiento alguno con las vías se prevé que el tren pueda alcanzar velocidades de varios cientos de kilómetros por hora, lo que le haría un serio competidor del transporte aéreo en viajes de corta y media distancia.

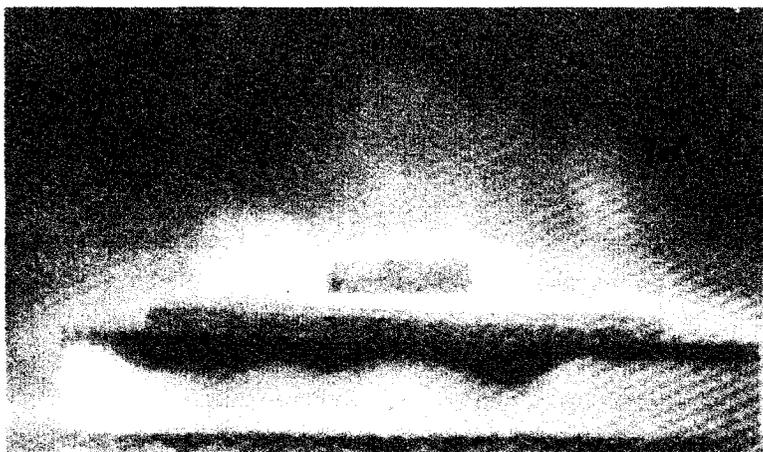


Figura 4.- «Levitación» magnética de un superconductor con composición $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, ⁴¹

Otro efecto característico de materiales superconductores es el Efecto Josephson, que describe la generación de una corriente espontánea superconductora entre dos superconductores separados por un mate-

⁴¹ M.A. Alario Franco en "De Superconductores y Otros Materiales". Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Madrid 1993.

rial no superconductor. El fenómeno ha proporcionado aplicaciones que ya se han hecho realidad. La más conocida se esconde bajo el nombre SQUID acrónimo de la denominación anglosajona del aparato “Superconducting Quantum Interference Device”, que es extremadamente sensible a cambios del campo magnético, y con el que pueden medirse voltajes del orden de 10^{-18} V, corrientes tan pequeñas como 10^{-18} A y campos magnéticos de unos 10^{-14} T. El uso del SQUID es muy variado, ya que cualquier fenómeno que produzca el más mínimo cambio del campo magnético terrestre puede ser detectado. Entre las aplicaciones más notables pueden citarse la detección de las ínfimas corrientes producidas en el cerebro humano, la prospección de minerales y petróleo, el estudio de la dinámica de tectónica de placas, la investigación en partículas fundamentales e incluso la detección de submarinos.

No será necesario seguir describiendo las todavía más numerosas aplicaciones de los materiales superconductores ya que creo cumplido el objetivo de mostrar que, tras las características de estos materiales, nos aguarda todo un mundo de avances tecnológicos. Y aunque muchos de ellos se han hecho ya realidad, y otros tantos se encuentran en desarrollo, la limitación para su implantación a gran escala es siempre la misma. El estado superconductor se alcanza tan solo a muy bajas temperaturas, cercanas a los 250 °C bajo cero, lo que obliga a la refrigeración permanente con un costoso helio líquido. También debe tenerse en cuenta que el valor de corriente crítica limita la densidad de corriente que puede transportar el superconductor, así como el campo magnético máximo que puede soportar sin volver al estado normal.

El desafío, por tanto, para los años próximos es el de buscar y encontrar nuevos materiales superconductores con el valor más alto posible de corriente crítica, campo crítico, y por supuesto temperatura crítica. En cuanto a este último, el valor ideal sería el de la temperatura ambiente.

Desde 1911, año del descubrimiento de la superconductividad en el mercurio líquido a 269 °C bajo cero, hasta 1973 en el que se descubrieron los denominados compuestos A15, con temperaturas críticas próximas a los 250 °C bajo cero transcurrieron 62 años y tan solo se incrementó la temperatura crítica en 19 °C. Durante estos años la más brillante aproximación a una teoría que explicase el fenómeno fue dada por Bardeen, Cooper y Schrieffer en 1957⁴². El modelo establecido en esta teoría, que les valió el premio Nobel en 1972, el segundo para Bardeen ya que había conseguido el primero por el descubrimiento del transistor, llevó a que la conducción se produce por el movimiento correlacionado de pares de electrones, cuya existencia es posible únicamente a muy bajas temperaturas. Las predicciones que se hicieron sobre cuál sería la temperatura crítica máxima que podría alcanzarse antes de que estos pares se rompieran, no sobrepasaban nunca los 243 °C bajo cero. Así, si retrocediéramos hasta el año 1986 nos encontraríamos ante un panorama sombrío respecto al futuro de los superconductores. No existían materiales superconductores con temperaturas críticas mayores que 250 °C bajo cero, y la teoría predecía que nunca podríamos elevarla por encima de los 243 °C bajo cero. Las maravillosas aplicaciones de los materiales superconductores parecían así quedar limitadas a un número muy reducido de usuarios. Los que pudieran pagar las miles de pesetas por cada litro de helio líquido consumido, en innumerable cantidad, durante el funcionamiento de los dispositivos. En realidad, el fenómeno de la superconductividad bien podría ser considerado en esos años como exótico en el campo de la Química, y no creo que sean muchos los que en su formación química contaran con mínimos conocimientos al respecto. Me gustaría pensar que este exotismo fue el motivo, y no otro, por el que en el verano de 1986 una gran compañía eléctrica española me denegó la financiación solicitada para la búsqueda de óxidos superconductores.

⁴² J. Bardeen, L.N. Cooper y J.R. Schrieffer, *Phys. Rev* **108**, 1175 (1957).

En realidad, por entonces el único óxido superconductor conocido consistía en un compuesto de bario, plomo bismuto y oxígeno ($\text{BaPb}_{0.75}\text{Bi}_{0.25}\text{O}_3$), conocido como BPB, que exhibía orgulloso su modesta temperatura crítica de 260 °C bajo cero.

Y éramos tan pocos los grupos de investigación que buscábamos nuevos materiales superconductores⁴³ que uno podía entonces deleitarse en la lectura pausada de la información que se iba publicando, fundamentalmente en revistas de física. Pero el panorama cambió a finales de 1986 cuando George Bednorz y Alex Müller de los laboratorios de IBM en Zürich publicaron en una revista, de no excesivo prestigio, un muy cauteloso artículo titulado “Possible high Tc superconductors in the Ba-La-Cu-O system”. Es posible que algún día sepamos si la elección de una revista de segunda categoría para la publicación de un trabajo que valió un premio Nobel en Física, el de 1987, se debió al temor de que un descubrimiento de tal categoría cayera, durante el proceso de aceptación, en manos de algún censor, que con poca ética profesional, retuviera sin publicar el artículo un excesivo, y a la vez apropiado, tiempo. Y es que en este artículo se describe la síntesis de un material, el ahora conocido como Balacuo ($\text{Ba}_x\text{La}_{2-x}\text{CuO}_4$) cuya temperatura crítica supera los 243 °C bajo cero. La barrera teórica, y hasta entonces experimental, había sido sobrepasada. Y no exagero si digo que miles de investigado-

⁴³ M. Marezio en “La Ciencia del Estado Sólido”, Ed. por M. A. Alario-Franco y M. Vallet-Regí. Real Academia de Ciencias, Madrid 1987

F. R. Gamble, F. J. Di Salvo, R.A. Klenn y T.H. Gebale, *Science* **168**, 568 (1970)

P.M. Williams, G. S. Parry y C.B. Scruby, *Phil. Mag.* **2**, 9695 (1974)

R. Chevrel, M. Sergent y J. Prigent, *J. Solid State Chem.* **3**, 515 (1971).

J.L. Vicent, S.J. Hilarius y R.V. Coleman, *Phys. Rev. Letters* **44**, 892 (1980)

F. García Alvarado, Tesina de Licenciatura, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Complutense de Madrid 1986.

F. García Alvarado, E. Morán, M. A. Alario-Franco, M. A. Gonzáles, J. L. Vicent, F. Lera y C. Rillo, *Solid State Ionics* **32-32**, 1167 (1989).

B. L. Chamberland en “Chemistry of Superconductor Material” Ed. por T. A. Vanderah, Noyes Publications, New Jersey 1992.

res de todo el mundo fueron abandonando en los siguientes meses sus consolidadas líneas de investigación para adentrarse, como si de una nueva fiebre del oro se tratara, en la aventura de la búsqueda de nuevos superconductores. Con tal cantidad de investigadores dedicados a esta tarea no es de extrañar que tan solo unos meses más tarde se produjera un nuevo descubrimiento. Investigadores de la Universidad de Houston encontraron superconductividad a 196 °C bajo cero en una mezcla de fases obtenida al sustituir lantano por ytrio en el Balacuo⁴⁴. La fase superconductor fue identificada y aislada en los laboratorios Bell de la compañía AT&T, en New Jersey⁴⁵. El nuevo óxido conocido como Ybacuo ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$) presenta una temperatura crítica de unos 183 °C bajo cero (ver Figura 5), temperatura que se encuentra por encima de la de ebullición del nitrógeno líquido, cuyo coste por litro, unas 100 pesetas, la hacen asequible incluso al laboratorio más modesto. Por otro lado las aplicaciones de los superconductores refrigerados a tan bajo coste parecen, entonces, hacerse viable desde el punto de vista económico. Esto incrementó aún más el número de investigadores que se adentraron en el campo, hasta tal punto que por primera vez los congresos de Química y Física de Materiales que incluían en sus programas, casi obligatoriamente, sesiones sobre superconductores parecían congresos de Medicina por el elevado número de participantes.

Se descubrió pronto que el Ybacuo en realidad era un miembro de una muy numerosa familia de superconductores con temperaturas críticas similares⁴⁶ (ver Figura 5). Y desde entonces otras familias nue-

⁴⁴ M.K. Wu, J.R. Ashburn, C.J. Torng, P. H. Hor, R. L. Meng, L. Gao, Z. J. Huang, Y. Q. Wang y C.W. Chu, *Phys. Rev. Letters* **58**, 908 (1987).

⁴⁵ R.J. Cava, B. Batlogg, R. B. Vand Dover, D.W. Murphy, S. Sunshine, T. Siegrist, J.P. Remeika, E. A. Rietman, S. Zahurak, y G.P. Espinosa, *Phys. Rev. Letters* **58**, 1676 (1987).

⁴⁶ F. García Alvarado, Tesis Doctoral, Universidad Complutense, Madrid 1991
F. García Alvarado, E. Morán, M. Vallet, J. M. G. Calbet, M.A. Alario Franco, M.T. Pérez Frías, J.L. Vicent, S. Ferrer, E. G. Michel y M.C. Asensio, *Solid State Comm.* **53**, 507 (1987)
M. A. Alario Franco, E. Morán, R. Saéz Puche, F. García Alvarado, U. Amador, M. Barahona, F. Fernández, M.T. Pérez Frías y J.L. Vicent, *Mat. Res. Bull.* **23**, 31 (1988).

vas se han ido descubriendo, la de superconductores de bismuto⁴⁷ $(\text{BiO})_2(\text{CaO})_m(\text{SrO})_2(\text{CuO})_n$, la de los superconductores de talio⁴⁸ $(\text{Tl}_m\text{Ba}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+m+2+x})$, etc., hasta situar la máxima temperatura crítica conocida cerca de los 140 °C bajo cero⁴⁹.

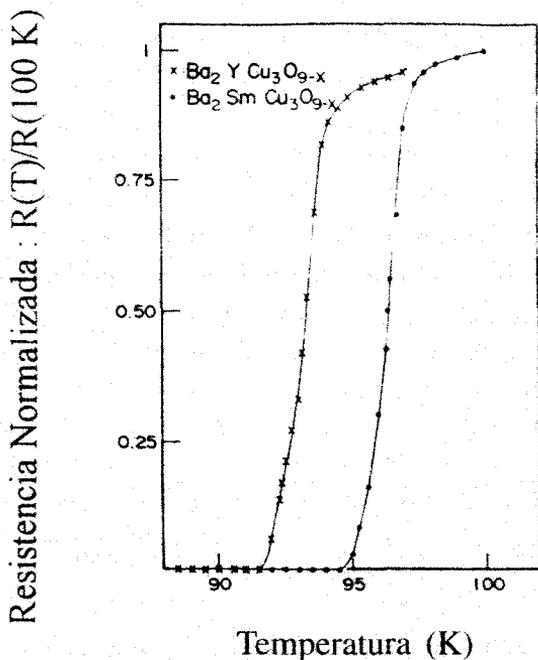


Figura 5.- Transición superconductora observada en los compuestos $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ y $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$. (F. García Alvarado *et al.*, Solid State Comm. 1987).

⁴⁷ C. Michel, M. Hervieu, M. M. Borel, A. Grandin, F. Deslandes, J. Provost y B. Raveau, Z. Phys. **B68**, 421 (1987).

H. Maeda, Y. Tanaka, M. Fukutomi y T. Asano, Japan J. Appl. Phys. **27**, L209 (1988).

⁴⁸ Z. Z. Sheng y A. Hermann, Nature **332**, 138 (1988).

⁴⁹ A. Schilling, M. Cantoni y J. D. Guo, Nature **363**, 56 (1993).

Con estos nuevos materiales las aplicaciones que antes he mencionado, se acercan cada vez más a una rentable realidad. No obstante, queda mucho camino por recorrer y muchos obstáculos por salvar ¿Podremos algún día preparar un superconductor a temperatura ambiente? No se dispone actualmente de una teoría completa del fenómeno de la superconductividad que nos permita hacer predicción alguna, y si creyésemos tenerla, la experiencia sacada de la Teoría de Bardeen, Cooper y Schrieffer nos demuestra el muy somero conocimiento que poseemos de las leyes de la naturaleza, por mucho que nuestra vanidad nos haga creer que es más profundo. Y así, no podemos si quiera adivinar lo que la naturaleza química puede poner a nuestra disposición. Asumiendo modestamente esta limitación, he pretendido tan solo lanzar una mirada a un futuro tan cercano y a la vez tan prometedor, que en estos momentos en algún laboratorio científico o industrial puede estar haciéndose presente.

He dicho

Edita: Universidad San Pablo - CEU
Isaac Peral n.º 58
28040 Madrid

Dep. Legal: GU-536/2000

Diseño Gráfico: Universidad de San Pablo-CEU
Imprime: Gráficas Minaya, S. A.