



MAX-PLANCK-GESellschaft

A mediados del siglo pasado los ingenieros de la NASA se enfrentaban a un difícil problema: sus naves espaciales estaban repletas de aparatos eléctricos. ¿De dónde, sin embargo, se puede obtener electricidad para operar el instrumental en el espacio lejos de cualquier central eléctrica? La solución que se les ocurrió a los expertos fue incorporar celdas de combustible como generadores de energía de a bordo. Estas fuentes de energía de construcción compacta generan electricidad con una eficiencia difícilmente alcanzable por otros métodos. Además, si se las alimenta con hidrógeno se crea como producto de "de-

de energía convencional a partir de carbón, petróleo o gas natural (más del 90 por ciento de la energía utilizada en todo el mundo es de origen fósil) se forma dióxido de carbono. Se lo conoce como gas de "efecto invernadero", y como tal, contribuye al calentamiento global poniendo en peligro el clima de nuestro planeta. En comparación, las celdas de combustible alimentadas por hidrógeno son mucho más "limpias", porque al combustionarse el hidrógeno con el oxígeno atmosférico, sólo se genera agua. Es lógico que también la industria automotriz ya hace años se interese mucho por estas celdas de combustible (Fig. A)

Reacción sin explosión

La celda de combustible para el automóvil del futuro

secho" una sola sustancia que no sólo es inofensiva, sino también esencial para los astronautas durante los vuelos: el agua. Por eso, hasta la fecha, las naves espaciales son equipadas con celdas de combustible.

COMO ENSEÑARLE AL MOTOR A NO ECHAR HUMO

Cada vez más investigadores están trabajando en el desarrollo de otras aplicaciones. Y esto tiene buenas razones. En la generación

¡Un vehículo con un motor eléctrico alimentado por medio de celdas de combustión de hidrógeno no emite ningún gas nocivo, sino solamente vapor de agua! Pero esta técnica es amigable con el medio ambiente sólo en la medida que el hidrógeno sea producido en forma sustentable, por ejemplo, utilizando energía solar para la electrólisis del agua. Dado que es en este punto donde la técnica todavía "hace agua", los ingenieros están trabajando en el desarrollo de celdas de combustible que puedan ser alimentadas con gas metano, gasolina especial →



A

► Los investigadores de Daimler Chrysler están probando celdas de combustible en un GoCart. Éstas pueden generar electricidad para la propulsión directamente a partir de la reacción del metanol con el oxígeno del aire.

© DaimlerChrysler

→ o metanol. La ventaja de estas unidades es que se pueden construir de un tamaño relativamente pequeño conservando una eficiencia mucho mayor a la de los motores de combustión convencionales (ver recuadro en la página 3). Por ende, producen menos dióxido de carbono a una misma potencia.

La transformación energética no sólo debe ser eficiente, sino también controlable. Pero para que el paseo de fin de semana no termine con una explosión, heridos o incluso muertos, los diseñadores de celdas de combustible tienen que evitar sobre todo una cosa: la reacción explosiva entre hidrógeno (H_2) y oxígeno (O_2). Esta amenaza aparece siempre que ambos reactivos se topan entre sí sin "protección". Los químicos hablan de la **reacción del hidrógeno**. Sucede que H_2 y O_2 almacenan mucha más energía que el agua, producto de su reacción química. Y esta diferencia se libera de

Nuevos materiales de membrana son testeados en pequeñas celdas de combustible de prueba (Siemens).

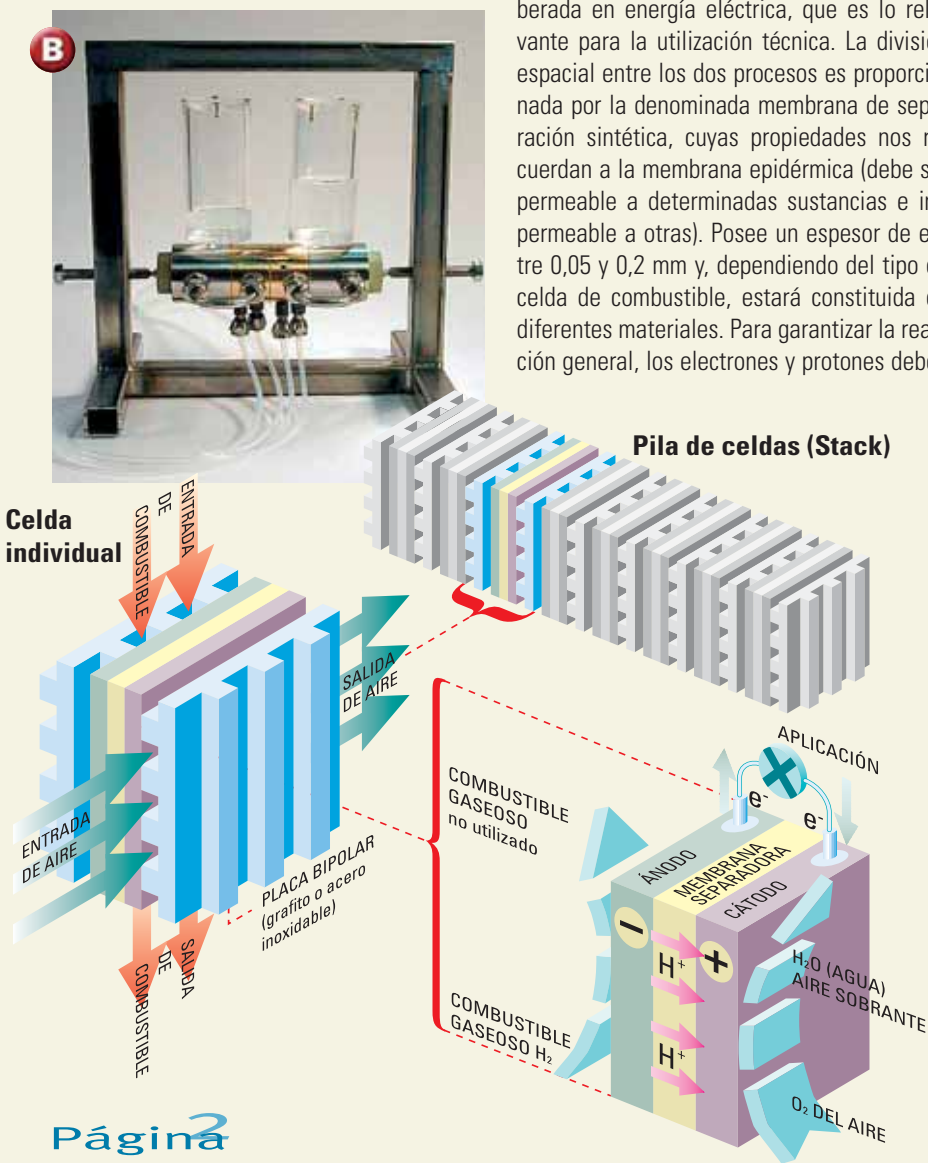
golpe durante la explosión en forma de energía térmica, es decir, calor. Tomando los recaudos necesarios, en teoría también se podría utilizar esta energía empleando un motor de combustión que la convierta en energía mecánica. Pero en ese caso, la eficiencia sería mucho menor que en la "combustión fría", en donde la energía química se convierte directamente en electricidad.

EL DIFÍCIL CAMINO DEL PROTOTIPO A LA SERIE

Al dividir la reacción del hidrógeno en dos etapas y hacerlas correr en forma separada dentro de una celda electroquímica, los ingenieros logran una "reacción sin explosión": el hidrógeno se **oxida** en el ánodo para formar protones, lo que significa que los dos átomos de hidrógeno ceden su electrón; en el cátodo el oxígeno se **reduce** a iones de oxígeno de carga negativa, tomando cada átomo de "O" dos electrones (Fig. C). La reacción corre de manera continua y controlada pudiendo convertir una gran parte de la energía química liberada en energía eléctrica, que es lo relevante para la utilización técnica. La división espacial entre los dos procesos es proporcionada por la denominada membrana de separación sintética, cuyas propiedades nos recuerdan a la membrana epidérmica (debe ser permeable a determinadas sustancias e impermeable a otras). Posee un espesor de entre 0,05 y 0,2 mm y, dependiendo del tipo de celda de combustible, estará constituida de diferentes materiales. Para garantizar la reacción general, los electrones y protones deben

fluir desde el ánodo hacia el cátodo. La celda de combustible de membrana ofrece dos vías alternativas: los electrones fluyen a través de un "circuito externo" desde el ánodo hacia el cátodo accionando, por ejemplo, un motor eléctrico mientras que los protones migran por el interior a través del separador hacia el cátodo, donde se combinan con los iones de oxígeno para formar agua como producto final. Teóricamente, esta celda de combustible entrega una tensión de 1,23 voltios. En la práctica, este valor suele ser algo más bajo. Para lograr voltajes más altos, las celdas se combinan en una pila (inglés: *stack*).

En principio, los investigadores e ingenieros han desarrollado numerosos prototipos de celdas de combustible. Sin embargo, todavía ninguna es producida en serie. Muchos dispositivos no funcionan con la fiabilidad suficiente o simplemente son demasiado caros. La razón principal es que los prototipos actuales están compuestos por materiales que originalmente no fueron diseñados con este fin. "Sólo mejores materiales podrán generar un nuevo impulso en la construcción de celdas de combustible", dice Klaus-Dieter Kreuer del Instituto Max Planck para la Investigación de Cuerpos Sólidos en Stuttgart. Por lo tanto, el especialista en desarrollo de materiales y sus colegas quieren desarrollar nuevas membranas que agreguen robustez y eficiencia a este tipo de celdas de combustible (las membranas de las celdas de combustible actuales entregan como máximo un vatio por centímetro cuadrado de superficie). En este punto los investigadores de Stuttgart están trabajando estrechamente con los químicos del Instituto Max Planck para la Investigación de Polímeros de Maguncia.



C Principio de funcionamiento de una celda de combustible de membrana. El flujo de electrones (e^-) se muestra en azul, el flujo de protones (H^+) en rojo. H_2 representa las moléculas de hidrógeno en el combustible gaseoso, O_2 las moléculas de oxígeno en el aire y H_2O el producto final (agua). Al igual que con las baterías, para obtener voltajes más altos, las celdas de combustible se apilan (arriba a la derecha).

mente a las moléculas de agua (los químicos hablan de **enlaces por puente de hidrógeno**), éstos pueden casi saltar de una molécula a la otra y de esta manera atravesar la membrana. Pero en este proceso son arrastradas algunas moléculas de agua individuales, porque éstas, en principio, no se fijan a la membrana y, tarde o temprano, la membrana se seca. El pasaje de H^+ se interrumpe y las celdas de combustible ya no entregan electricidad.

NUEVO TRANSPORTADOR DE PROTONES A TRAVÉS DE LA MEMBRANA

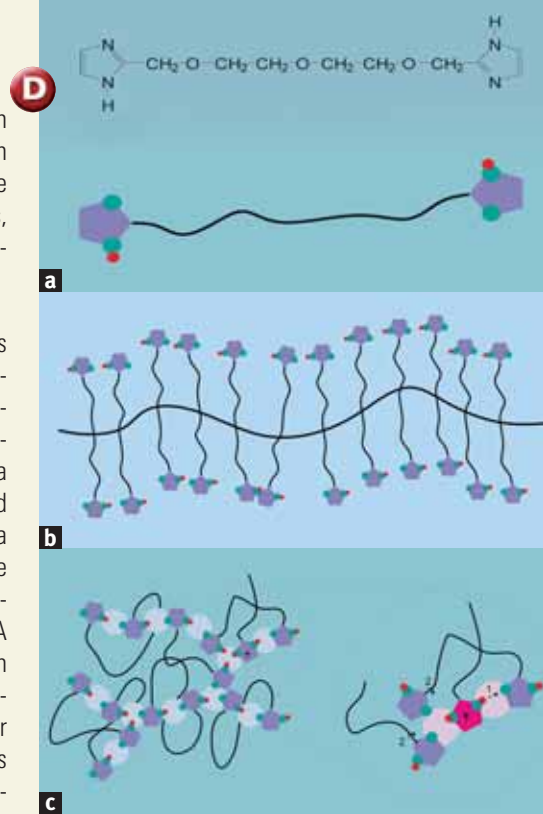
“Actualmente, los ingenieros pueden evitar esto sólo mediante un gran esfuerzo técnico que, al mismo tiempo, les genera otro tipo de problemas”, explica Klaus-Dieter Kreuer. Además, existe otro problema con las membranas que contienen agua: debido a que el agua hierve a 100 grados Celsius, la temperatura máxima de funcionamiento de las celdas no debe superar los 90 grados. Sin embargo, hay muchas razones por las que los investigadores gustaría poder operarlas a temperaturas más altas – entre otras cosas, porque entonces la disipación del calor de las celdas sería más fácil. Por eso, el objetivo de los investigadores del Instituto Max Planck de Stuttgart y Mainz es desarrollar membranas libres de agua que operen a temperaturas de entre 150 y 200 grados Celsius. Por eso, los científicos están buscando mecanismos de transporte de protones totalmente nuevos. En lugar de que los iones de hidrógeno migren a través de la membrana saltando de una molécula de agua a la siguiente, la idea es que lo hagan por medio de moléculas firmemente ligadas a la misma. Así, no habría riesgo de que sus “moléculas portadoras” sean arrastradas. Con este propósito, Kreuer y sus colegas sintetizan diversos compuestos sintéticos que contienen los denominados **compuestos heterocíclicos**. Se trata de una estructura cíclica de car-

bono que, en este caso, además cuenta con átomos de nitrógeno. Los protones se mueven de un heterociclo al otro, como si se tratara de un “pasamanos” en la lucha contra las llamas, donde el cubo de agua se conduce de un ayudante al siguiente (Fig. D).

En el marco de numerosos experimentos, los investigadores probaron diferentes enlaces entre compuestos sintéticos y heterociclos enlazados de distinta forma. Para ello, construyeron pequeñas celdas de combustible de prueba y así controlaron la conductividad y estabilidad de los nuevos materiales de membrana. Para esto, la membrana artificial transparente se tensa entre dos electrodos circulares revestidos con catalizadores (aleación de platino). A través de los cilindros de metal se suministran el hidrógeno y el oxígeno. Si se utilizan membranas convencionales, los gases deben ser previamente humedecidos. Por eso, sobre los cilindros de metal hay recipientes de vidrio llenos de agua (Fig. B). “Mientras tanto logramos tener un sistema que muestra suficiente conductividad a 200 grados Celsius”, revela Kreuer. Sin embargo, el nuevo polímero aún no es lo suficientemente estable. “Del lado del oxígeno observamos cómo el plástico se destruye lentamente.” Los científicos ahora quieren averiguar por qué sucede esta degradación de la membrana y cómo evitarla. Una vez que se hayan resuelto estos problemas, deberán realizarse nuevas pruebas prácticas con módulos de celdas de combustible más grandes.

VALIOSA “NANOCOLABORACIÓN” INICIAL

Incluso Manfred Reetz, director del Instituto Max Planck para la Investigación del Carbón en Mülheim an der Ruhr, analiza nuevos materiales que en un futuro podrían ser utilizados en la tecnología de celdas de combustible. Los investigadores de Mülheim desarro-

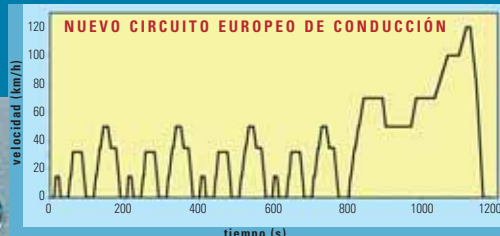


► Los anillos pentagonales del imidazol son enlazados por dos unidades de óxido de etileno (a) e inmovilizados por un esqueleto de polímeros (b). A continuación, el transporte de protones se realiza a lo largo de la red de puentes de hidrógeno de las moléculas modelo (c).

llan revestimientos para los electrodos hechos de metales preciosos. Después de todo, para que la “combustión fría” en una celda de combustible de hidrógeno pueda realizarse, ambos electrodos deben estar recubiertos con un **catalizador** (una sustancia que acelera las reacciones químicas pero no se consume durante el proceso). En el cátodo normalmente se utiliza como catalizador una capa de platino finamente distribuida - en caso de que se vaya a quemar hidrógeno vale lo mismo para el ánodo. Sin embargo, muchos ingenieros ven el futuro en el desarrollo de celdas de combustible que funcionen con metanol. →

VISTAZO AL FUTURO

	Eficiencia (%)	Consumo equivalente (L/100 km)
Motor de combustión		
Nafta	24	4,1
Gasoil	28	3,6
Gas (tubo a presión)	24	4,2
Celda de combustible		
Hidrógeno (tubo a presión)	41	2,5
Metanol	32	3,3



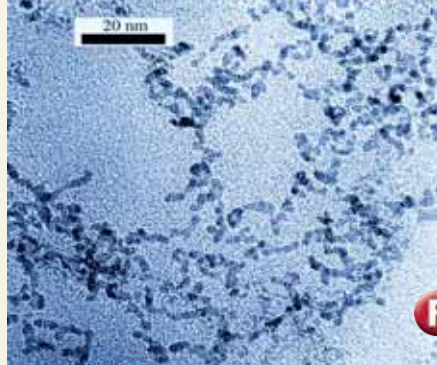
Los científicos del Centro de Investigación Jülich han comparado el consumo energético de vehículos con los mismos valores de aceleración (0-100 km/h en 15s) y velocidad máxima (170-190 km/h), pero diferentes motores. La pista de prueba fue el llamado Nuevo Circuito Europeo de Conducción, un recorrido de 20 minutos con un perfil definido con precisión, en el cual todo vehí-

culo nuevo que sale al mercado debe ser testeado. En los motores de combustión los investigadores no se basan en la tecnología actual, sino en aquella que se avizora para los próximos años. El consumo de combustible equivalente fue calculado a partir del contenido energético del combustible gastado (por ejemplo, hidrógeno).

Fuente: Departamento de Análisis de Procesos y Sistemas y Grupo Programático de Investigación de Sistemas y Desarrollo Tecnológico



▲ Catalizadores compuestos de varios metales preciosos son menos susceptibles a la "intoxicación" por monóxido de carbono que los catalizadores de platino puro. Rutenio, osmio e iridio son testeados.



▲ Imagen de microscopio electrónico de las nanopartículas metálicas de platino-rutenio en estado de reducción y una barra de 20 nm como referencia de tamaño.

→ Porque, a diferencia del hidrógeno, el metanol puede ser producido con facilidad a escala industrial. Y es líquido, lo que simplifica enormemente el manejo en comparación al hidrógeno. En un denominado reformador, que puede estar fuera o directamente dentro de la misma celda de combustible, el metanol se convierte en hidrógeno, monóxido de carbono y dióxido de carbono, y ese hidrógeno luego se oxida para formar agua. Sin embargo, el monóxido de carbono (CO) resultante "envenena" al platino puro del catalizador; estas moléculas de CO se incrustan en los llamados centros activos y de esta manera lo paralizan.

Catalizadores compuestos de varios metales preciosos son menos vulnerables a la "intoxicación". Por eso, Manfred Reetz y sus colaboradores están trabajando en el desarrollo de catalizadores que contienen hasta cuatro metales diferentes (Fig. E). Para lograrlo, producen **nanopartículas metálicas**, pedacitos de metal con un tamaño de unos pocos nanómetros (millonésimas de milímetro). Su ventaja: en comparación a su diminuto diámetro, estas partículas poseen una superficie muy grande (un gramo de estas "partículas enanas" contiene entre 200 y 300 metros cuadrados, un área del tamaño de un jardín promedio) - y ahí es donde tienen lugar las reacciones electroquímicas que son catalizadas por los metales. En la síntesis de partículas de metal, los investigadores del Instituto Max Planck en Mülheim aplican un método poco frecuente en comparación con otros grupos de trabajo. Inicialmente, producen nanopartículas de óxido de metales que luego, en un segundo paso, reducen a partículas metálicas. La receta del laboratorio de química inorgánica es asombrosamente simple: sales de metal, como el cloruro de platino ($PtCl_4$) se dejan disolver en agua. Los químicos añaden una base, el carbonato de sodio (Na_2CO_3) y calientan la solución a entre 60 y 80 grados Celsius. Normalmente ahora se formarían gruesos grumos

de óxido de platino (PtO_2) que serían inadecuados para el desarrollo del procesamiento. Sin embargo, un pequeño truco ayuda a los científicos: si a la solución de sales de metal se le agrega un agente tensioactivo, el principal ingrediente en jabones y detergentes, el acoplamiento de las moléculas tensioactivas evita el "apelmazado". El resultado son nanopartículas de óxido de metal que pueden ser transformadas en el revestimiento de los electrodos de las celdas de combustible. Para eso, el óxido de metal se fija sobre un apoyo - que pueden ser pequeños granos de hollín comprimidos hasta formar el electrodo poroso - y finalmente se reduce a metal.

RECETAS SIMPLES DESDE LA COCINA QUÍMICA

"Estos procesos químicos son bastante simples", dice Manfred Reetz. De hecho, los métodos que habitualmente se usaban para la producción de nanopartículas metálicas son mucho más complicados. Por lo general, requieren que el oxígeno atmosférico sea excluido y utilizan solventes orgánicos, que luego deben ser eliminados de forma especial. Debido a que el proceso de Mülheim se realiza con soluciones acuosas, es más amigable para el medio ambiente que métodos comparables. Las nanopartículas de platino, rutenio, osmio e iridio son especialmente adecuadas para catalizadores de celdas de combustible que queman metanol. En una inspección más cercana, las partículas de platino revelan otra característica útil en todo catalizador (Fig. F): el tamaño de las nanopartículas varía muy poco, lo cual es bastante inusual. No hay que olvidar que éstas poseen un tamaño de apenas unas dos mil billonésimas partes de metro (2×10^{-9} m). Esta precisión permite producir catalizadores con propiedades perfectamente reproducibles. En extensos ensayos, los nuevos compuestos de metal tienen que demostrar ser realmente adecuados para su aplicación técnica como membranas en celdas de com-

bustible. Los investigadores examinan principalmente las propiedades electroquímicas y la estabilidad de sus nanopartículas.

ELECTRICIDAD YA NO SÓLO DEL ENCHUFE

No sólo la industria automotriz podría beneficiarse del desarrollo de nuevos materiales para celdas de combustible. Desde hace algunos años, muchos científicos e ingenieros están trabajando en las llamadas celdas de combustible de óxido sólido que pueden ser utilizadas como pequeñas plantas productoras de electricidad para, por ejemplo, una casa. Como separadores, en lugar de las membranas sintéticas, en este caso se utilizan placas ultra finas de cerámica. Las celdas trabajan sin agua hasta temperaturas de entre 700 y 1000 grados Celsius y pueden funcionar no sólo con hidrógeno, sino también con gas natural. El agua (o la mezcla de agua y dióxido de carbono) que se forma como producto de la reacción durante la combustión, se libera en forma de vapor muy caliente. Esta energía calórica adicional se puede utilizar, por ejemplo, para el circuito de agua caliente o para mover una turbina de vapor. Los expertos estiman que de este modo, alrededor del 70% de la energía almacenada originalmente en el combustible puede pasar a estar disponible como energía eléctrica - una cifra con la que los generadores de electricidad convencionales sólo pueden soñar. Sin embargo, para las celdas de combustible de óxido sólido vale lo mismo que para las celdas de combustible de membrana: sólo mediante una intensa investigación básica se podrá desarrollar un material a la medida que haga de los prototipos de hoy, productos fiables y accesibles fabricados en serie. Lo que sobran son ideas para posibles aplicaciones en la vida cotidiana. Ya hoy los investigadores están experimentando con ordenadores portátiles y teléfonos celulares que se alimentarían con diminutas celdas de combustible.

PIE DE IMPRENTA

Sociedad Max-Planck, departamento de información y relaciones públicas, Hofgartenstraße 8, 80539 München / e-mail: presse@gv.mpg.de

Redacción: Dra. Christina Beck

Texto: Ute Hänslers

Traducción: Astrid Wenzel

Diseño: www.haak-nakat.de

La versión en español se hizo con el apoyo del DAAD y con fondos del Ministerio de Relaciones Exteriores de Alemania.



SIEMENS



Deutscher Akademischer Austausch Dienst
Servicio Alemán de Intercambio Académico

