

III CONGRESO INTERNACIONAL SOBRE CAMBIO CLIMATICO Y DESARROLLO SUSTE

ENERGÍA LIMPIA EN BASE A HIDRÓGENO

Andreasen G, Ramos S, Barsellini D, Triaca WE.

Instituto de Investigaciones Físicoquímicas Teóricas y Aplicadas (INIFTA), Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de La Plata-CONICET, C.C. 16, Suc. 4, (1900) La Plata, Argentina. - wtriac@inifta.unlp.edu.ar

La producción de energía mediante la combustión térmica convencional de fuentes fósiles presenta serias desventajas, ya que es un método indirecto e ineficiente que implica una etapa intermedia de conversión de calor en trabajo mecánico con un límite de eficiencia intrínseca impuesto por el ciclo de Carnot. Así, por ejemplo, una máquina térmica que opera entre 350 °C y 100 °C tiene una eficiencia máxima intrínseca de 40% y, en la práctica, existen otras pérdidas de energía extrínsecas, tales como disipación de calor a los alrededores, calor generado por fricción en las partes móviles, combustión incompleta, etc., que disminuyen aún más el rendimiento. De este modo, en los motores de combustión interna, la eficiencia práctica es del 15 % al 20 %, esto es, se desperdicia más del 80% de la energía química contenida en el combustible. Además, como productos de la combustión se arrojan al ambiente principalmente agua y dióxido de carbono, que contribuye al calentamiento global, y otros contaminantes, tales como monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno (NO_x), óxidos de azufre (SO_x), hidrocarburos no saturados, material particulado, etc., que provocan desequilibrios ecológicos (lluvias ácidas, reducción de la capa de ozono, formación de smog, etc.) y/o dañan la salud. Por otra parte, debido a la baja eficiencia de conversión del método, se desaprovechan las limitadas reservas de combustibles fósiles, que han tardado millones de años en formarse.

Para resolver estos problemas se han desarrollado sistemas para el aprovechamiento integral de fuentes primarias de energía limpias y renovables que puedan sustituir a los combustibles fósiles, tales como energías solar, eólica, hidráulica, geotérmica, mareomotriz, etc. [1].

Si bien se puede imaginar un escenario futuro donde las fuentes primarias renovables, principalmente energías eólica y solar, ocupen un lugar predominante en la matriz energética sustituyendo a los combustibles fósiles, existen problemas relacionados con el almacenamiento y el transporte de la energía primaria y la facilidad de su conversión de acuerdo a la demanda. En este aspecto, debe señalarse que, en el lugar de consumo final, sólo el 25 % de la energía primaria se usa como electricidad y el 75 % restante como combustible. Por lo tanto, las energías primarias renovables deben usarse tanto para generar electricidad como para manufacturar combustibles. Es en este escenario donde aparece el hidrógeno como combustible ideal para el reemplazo de los combustibles fósiles fluidos (gases y líquidos), ya que puede obtenerse fácilmente por electrólisis del agua a partir de fuentes primarias renovables. El hidrógeno electrolítico, convenientemente almacenado, ya sea como gas comprimido, líquido a bajas temperaturas o en estructuras sólidas bajo la forma de hidruro metálico, puede transportarse al centro de consumo donde su combustión produce energía útil.

CICLO DEL HIDRÓGENO

El hidrógeno se encuentra en abundancia en la naturaleza, principalmente como constituyente del agua. Además, almacena mayor cantidad de energía por unidad de peso (33,3 kWh/kg) que cualquier otra sustancia y su combustión produce agua, sin contaminar el ambiente. Por otra parte, puede almacenarse fácilmente como gas comprimido (~200 bar), como líquido a bajas temperaturas (-253 °C) o como hidruro metálico formando estructuras sólidas. Recientemente, se han desarrollado nanoestructuras de carbono (nanofibras de grafito y nanotubos de carbono), que permiten almacenar aparentemente grandes cantidades de hidrógeno, entre 10 % y 20 % en peso, aunque los resultados son todavía controversiales [2]. El hidrógeno es también fácilmente transportable por tuberías y se puede usar directamente en quemadores o motores produciendo calor por combustión limpia, o convertir directamente su energía química en electricidad en dispositivos electroquímicos, conocidos como celdas de combustible, en un proceso de alta eficiencia.

Puesto que el hidrógeno no se encuentra libre en la naturaleza, se debe gastar energía para producirlo, tal como en el caso de la electricidad. El hidrógeno no es una fuente energética sino un intermediario entre la fuente primaria y el dispositivo de conversión de energía donde se lo utilice, *i.e.*, es un vector o portador de energía. Por tanto, para una utilización masiva del hidrógeno en sistemas sostenibles de energía se lo debe producir a bajo costo.

En sistemas sostenibles de energía, la necesaria complementación de dispositivos de funcionamiento intermitente, tales como convertidores solares fotovoltaicos o turbinas eólicas, puede lograrse en base a la producción de hidrógeno mediante electrólisis de agua fuera de las horas de pico, esto es, en base a la conversión de energía eléctrica en energía química del hidrógeno. El hidrógeno producido y convenientemente almacenado, en alguna de las formas ya descritas, puede posteriormente transportarse al centro de consumo, donde su combustión térmica produce calor y agua, aunque también se genera algo de NO_x si se

III CONGRESO INTERNACIONAL SOBRE CAMBIO CLIMATICO Y DESARROLLO SUSTE

utiliza aire como comburente, o alternativamente, alimentar a celdas de combustible produciendo directamente electricidad y agua, que vuelve al ambiente, sin emisión de contaminantes. De este modo, el ciclo del hidrógeno constituye un sistema cerrado, a diferencia del ciclo de combustibles fósiles, ya que el combustible se regenera. Cabe también señalar que, alternativamente, con el excedente de electricidad se pueden cargar baterías electroquímicas de tecnología de avanzada, cuya energía puede utilizarse cuando sea necesario.

Para alcanzar alta eficiencia de conversión y máxima velocidad de drenaje de corriente en los dispositivos electroquímicos, se requiere minimizar las pérdidas de energía de los procesos involucrados. De ahí, la necesidad de desarrollar nuevos materiales de electrodo de composición y estructura superficial adecuadas para optimizar los procesos de conversión y almacenamiento de energía. Actualmente, se desarrollan a nivel mundial programas de investigación sobre sistemas avanzados de conversión y almacenamiento de energía en base a tecnologías de hidrógeno, que comprenden su producción, almacenamiento y combustión.

PRODUCCIÓN Y ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO

Existen diversos métodos de producción de hidrógeno: reformado de gas natural, alcoholes y productos de gasificación de la hulla, electrólisis del agua, termólisis y procesos termoquímicos, fotoquímicos y fotobiológicos. De todos ellos, la electrólisis del agua y el reformado de gas natural son los únicos métodos que han alcanzado un alto grado de desarrollo y competitividad para aplicarse a la producción de hidrógeno en gran escala.

El reformado de gas natural es, al presente, el método más económico para la producción de hidrógeno, pero tiene la desventaja, anteriormente mencionada, de la emisión de dióxido de carbono, el cual debe ser removido por procedimientos complejos. Sin embargo, si el proceso global incluye la combustión electroquímica en celdas de combustible del gas rico en hidrógeno producido, se logra reducir a un tercio la emisión de contaminantes.

Las tecnologías avanzadas de electrólisis del agua, ya sea a baja (75-85°C, electrolito alcalino o de polímero sólido) o a alta temperatura (1000°C, electrolito de óxido sólido), son procesos limpios con rendimientos superiores al 85-90%. Las investigaciones actuales se orientan hacia nuevos conceptos en diseños de electrodos y mejoras en los materiales de celda, para bajar costos y aumentar la eficiencia, confiabilidad y durabilidad del proceso.

El costo de producción de hidrógeno es, al presente y según la fuente primaria utilizada, aproximadamente dos a tres veces superior al de la gasolina. Debe recordarse que al costo de producción debe sumarse u\$s 6-8 por GJ de energía producida por los gastos adicionales de compresión, almacenamiento, transporte y distribución local de hidrógeno gaseoso. Sin embargo, si se tiene en cuenta que la eficiencia de conversión de hidrógeno a electricidad en celdas de combustible es, al menos, tres veces mayor que la correspondiente a la combustión térmica de la gasolina, surge que el hidrógeno sería competitivo en costo con los combustibles actuales, tales como gasolina y gasoil. Esta situación resulta más favorable al hidrógeno si se tiene en cuenta el costo del daño ambiental derivado del uso de combustibles fósiles fluidos.

Se ha señalado anteriormente que en sistemas sostenibles de energía en base a hidrógeno, este combustible debe almacenarse para cubrir las diferencias diarias y estacionales entre la disponibilidad de la fuente primaria de energía y la demanda. Los tanques de acero clásicos permiten almacenar hidrógeno comprimido usualmente a aproximadamente 200 bar. El uso de cilindros de aluminio reforzado con fibras de carbono posibilita aumentar la cantidad de hidrógeno almacenado de 1% a 4% con respecto al peso del recipiente. También se han desarrollado materiales compuestos reforzados con fibras de carbono que permiten fabricar tanques que soportan presiones superiores a 450 bar [2].

El almacenamiento de hidrógeno como líquido resulta particularmente atractivo para algunas aplicaciones (transporte aéreo y espacial) por la mayor densidad de energía volumétrica (2,4 kWh/l) respecto a la del hidrógeno comprimido (0,6 kWh/l a 170 bar). El almacenamiento criogénico presenta, sin embargo, la desventaja que el proceso de licuefacción del hidrógeno (temperatura de condensación -253°C a 1 bar) y su mantenimiento insumen 35-40% de su contenido energético. De ahí, que se hayan desarrollado nuevas técnicas de licuefacción y sistemas de almacenamiento a baja temperatura superaislados, particularmente para la tecnología espacial.

Otro procedimiento que ha recibido atención preferente es el almacenamiento del hidrógeno en aleaciones metálicas bajo la forma de hidruro. Las reacciones de hidruración/deshidruración son procesos reversibles que permiten absorber y desorber hidrógeno por variación de la temperatura y presión. El interés de este método de almacenamiento se basa en que ciertos metales y aleaciones pueden acomodar intersticialmente más átomos de hidrógeno que los correspondientes al mismo volumen de hidrógeno líquido. Así, el hidruro de composición LaNi_5H_6 tiene una densidad de energía volumétrica de 3,3 kWh/l que supera a las del hi-

drógeno líquido e hidrógeno comprimido, como así también a la del metano a 170 bar (1,7 kWh/l), aunque es más baja que los 8.8 kWh/l que provee la gasolina. Para algunas aplicaciones donde el espacio disponible para el tanque de combustible está limitado, como en el caso de los automóviles, el almacenamiento de hidrógeno como hidruro metálico en estructuras sólidas constituye, de este modo, una alternativa confiable y segura.

Las investigaciones cooperativas en esta área entre grupos de trabajo del INIFTA y el Centro Atómico Bariloche de la Comisión Nacional de Energía Atómica, han permitido el diseño y preparación de compuestos intermetálicos en base a LaNi_5 y ZrCr_2 , capaces de absorber y desorber hidrógeno a presiones cercanas a 1 atm y temperatura ambiente [3-5]. En este aspecto, se debe señalar que se ha diseñado y construido un prototipo de almacenador, que utiliza 500 g de una aleación tipo AB_5 , cuyo hidruro tiene una presión de equilibrio apta para su uso como fuente de alimentación confiable de una celda de combustible, ya que puede ser cargada directamente con el hidrogeno producido en un electrolizador sin necesidad de compresión adicional [6]. La capacidad nominal del almacenador es de 80 litros de hidrógeno, que en condiciones normales equivale a 3 h de operación de un sistema de celdas de combustible de 30 W. El contenedor de hidruro cuenta con superficies extendidas internas (discos) y externas (aletas) de aluminio para favorecer la transferencia de calor. El diseño del prototipo permite el monitoreo de la presión interior y de las temperaturas del centro y de la pared exterior del almacenador, para distintos caudales de descarga.

Por otra parte, resulta también de interés para el almacenamiento de hidrógeno desde la fase gaseosa el empleo de hidruro de magnesio o de alguno de sus compuestos intermetálicos preparados mediante el aleado mecánico hasta la escala de nanopartículas, con fases catalíticas que permiten disminuir la temperatura de desorción a un valor del orden de los 200 °C o aún menor, con las correspondientes presiones de equilibrio mayores que la presión atmosférica. También, los hidruros complejos, tales como LiBH_4 con 18 % de hidrógeno en masa, son promisorios como nuevos compuestos almacenadores con altas densidades gravimétrica y volumétrica de hidrógeno.

COMBUSTIÓN ELECTROQUÍMICA DE HIDRÓGENO

La forma más eficiente para utilizar la energía química del hidrógeno es su conversión directa a electricidad en celdas de combustible [7]. Estos dispositivos operan con alta eficiencia de conversión no limitada por la restricción de Carnot, ya que no existen etapas intermedias de conversión de calor a trabajo mecánico. En una celda de combustible, los reactivos (hidrógeno y oxígeno del aire) alimentan a los correspondientes electrodos, constituidos por materiales porosos catalizados que se encuentran en un electrolito adecuado, estableciéndose una diferencia de potencial que mantiene un flujo de electrones, esto es, una corriente eléctrica, que puede efectuar trabajo útil.

En la celda se genera también una cierta cantidad de calor debido al cambio entrópico ($T\Delta S$) asociado a la reacción de combustión electroquímica del hidrógeno, por lo cual la eficiencia teórica de conversión a electricidad es algo inferior al 100 %. De este modo, para la celda de combustible de hidrógeno-oxígeno, la eficiencia máxima intrínseca es de 91 % a 150 °C. En la práctica, cuando se drenan corrientes apreciables existen otras pérdidas de energía, que se manifiestan como calor liberado, conocidas como sobrepotenciales, asociadas a la irreversibilidad de las reacciones que ocurren en la celda, esto es, procesos de transferencia de carga y reacciones asociadas y de transporte de materia, y a caídas óhmicas, que disminuyen la eficiencia práctica a valores de 50-70 %, según las condiciones de operación. Estas características determinan que las celdas de combustible sean útiles también como sistemas de cogeneración de electricidad y calor, alcanzándose en este caso eficiencias totales de 80-85 %. El otro producto es agua, que no contamina el ambiente. Además, las celdas de combustible carecen de partes móviles, por lo que funcionan silenciosamente y sin desgaste mecánico.

Los distintos tipos de celda de combustible de hidrógeno-oxígeno actuales se clasifican por el tipo de electrolito empleado, que define la temperatura de operación de la celda. Así, existe un amplio espectro de celdas que utilizan distintos electrolitos: membrana de intercambio de protones (60-80 °C), álcali acuoso (80 °C), ácido fosfórico (190-200 °C), carbonato fundido (650 °C) y óxido sólido (700-1000 °C). Cabe destacar que en los últimos años se ha prestado una atención preferente a las celdas que utilizan alcoholes, tales como metanol y etanol, como combustible. Estos alcoholes son sustancias parcialmente oxigenadas con alto contenido de hidrógeno que poseen densidades de energía que alcanzan el 50-60% de la correspondiente a la gasolina, y que al ser líquidas a temperatura ambiente constituyen una forma de almacenamiento de hidrógeno segura y de fácil manejo, muy atractiva para aplicaciones en el transporte vehicular. En este trabajo se hará sólo referencia a las celdas de temperaturas bajas e intermedias, que son las que han alcanzado mayor grado de desarrollo.

Para las reacciones electrónicas de interés en la conversión de energía a temperaturas bajas e intermedias se requieren electrocatalizadores para aumentar la velocidad de la reacción de transferencia de carga. Para la mayoría de estas reacciones los mejores electrocatalizadores son metales nobles, tales como platino,

rutenio, paladio y otros. De ahí, que se realicen esfuerzos para encontrar sustitutos adecuados de estos materiales de bajo coste, aunque los resultados hasta ahora no son completamente satisfactorios. Por lo tanto, se ha tratado de utilizar más eficazmente a los metales nobles preparándolos en formas que presenten una mayor actividad catalítica. Así, se han desarrollado distintos métodos para la preparación de electrocatalizadores de tamaño de partícula del orden del nanometro, de modo de ofrecer una alta área superficial, que se dispersan sobre soportes adecuados y que han permitido obtener altos rendimientos en reacciones de conversión de energía a valores de carga de electrocatalizador tan bajos como $0,05 \text{ mg/cm}^2$. Estudios recientes han mostrado la influencia, entre otras variables, de la nanomorfología del electrocatalizador metálico, del tamaño de la cristalita del metal y de las interacciones metal-soporte sobre la actividad de los electrocatalizadores altamente dispersados [7,8]. Consiguientemente, se debe prestar atención a las condiciones de preparación de los electrodos y a la selección adecuada del soporte.

Con respecto al estado del arte a nivel mundial en esta área, en los últimos años se han producido avances importantes en el desarrollo de celdas de combustible de hidrógeno/oxígeno y de metanol/oxígeno que emplean la tecnología de membrana de intercambio de protones (PEM), con la cual se alcanzan altas eficiencias de conversión y densidades de potencia. Entre estos avances se deben destacar: i) el desarrollo de membranas fluorsulfónicas; ii) la reducción de 10 a 100 veces de la carga de platino en los electrodos mediante la utilización de nanopartículas soportadas en carbón de alta área específica y el impregnado de la capa activa del electrodo con electrolito de conducción protónica para extender la zona de reacción; iii) la optimización de la estructura del ensamble electrodo-membrana-electrodo [8], que ha permitido alcanzar altas densidades de corriente superiores a 1 A/cm^2 . Estas mejoras han posibilitado una sustancial reducción del costo por kilovatio de potencia, lo cual permite la aplicación de las celdas PEM como fuente de potencia para vehículos eléctricos y una amplia variedad de sistemas portátiles.

Sin embargo, existen todavía pérdidas de energías importantes asociadas a problemas de electrocatálisis de las reacciones electrónicas que disminuyen la eficiencia de conversión a electricidad. Para reducir estas pérdidas se requiere el desarrollo de electrocatalizadores selectivos con estructuras superficiales de alta actividad catalítica que permitan minimizar las pérdidas de energía relacionadas con los sobrepotenciales de electrodo, principalmente los correspondientes a la electroreducción de oxígeno y a la electrooxidación de metanol y de etanol, y así conducir los procesos de conversión de energía a velocidad y eficiencia máximas. Se ha producido en este aspecto un gran salto adelante mediante estudios combinados de cinética electroquímica y ciencia de la superficie, que han permitido la comprensión de procesos electroquímicos a nivel atómico y posibilitado establecer la correlación entre la estructura superficial y la composición química del catalizador con su actividad y selectividad para una reacción particular [7]. En la preparación de electrodos de alta tecnología, uno de los mayores desafíos consiste en depositar sobre soportes adecuados nanopartículas del electrocatalizador altamente dispersadas con la estructura superficial requerida para un óptimo comportamiento en operación.

Se debe señalar en esta línea de trabajo un desarrollo reciente de nuestro grupo de trabajo del INIFTA que permite obtener nanopartículas de platino facetadas sobre soportes conductores mediante la aplicación de electrólisis pulsante a alta frecuencia en soluciones conteniendo complejos del metal [9]. Los estudios de caracterización de los electrodeósitos de platino mediante las técnicas de microscopía de efecto túnel, microscopía electrónica de transmisión, microscopía electrónica de barrido y voltamperometría cíclica revelaron la presencia de nanopartículas de platino altamente facetadas con orientación cristalográfica preferente (111), las cuales mostraron una actividad catalítica para la reacción de electroreducción de oxígeno que era superior a la de nanopartículas de platino policristalino soportadas sobre carbón comerciales.

Por otra parte, el estudio del comportamiento a $60 \text{ }^\circ\text{C}$ de una celda de combustible PEM de hidrógeno/oxígeno que utilizaba electrodos porosos de difusión de gas con nanopartículas de platino facetadas tipo (111) incorporadas en el cátodo mostró un rendimiento superior a la de una celda con nanopartículas de platino policristalino altamente dispersadas sobre soportes carbonosos [9,10]. El mejor comportamiento en operación de la celda de combustible con nanopartículas de platino facetadas tipo (111) se debe a que la presencia de este tipo de nanopartículas en el cátodo disminuye el bloqueo de la superficie del electrodo por intermediarios peroxídicos, producidos durante el proceso de electroreducción de oxígeno, favoreciendo de este modo el proceso global de conversión de energía. A través de las investigaciones realizadas se han podido establecer bases racionales para el diseño y construcción de electrodos de alta tecnología para uso en celdas de combustible de avanzada.

En otra línea de investigación más aplicada, se han diseñado y construido en INIFTA prototipos de celdas de combustible de hidrógeno/oxígeno de módulos múltiples ("stack"), usando membranas de intercambio de protones como electrolito y electrodos de platino-carbón-PTFE. Se ha evaluado el comportamiento de los prototipos bajo distintas condiciones de funcionamiento en un banco de prueba, construido en el laboratorio, con sistemas electrónicos de control y medición de las variables operativas de celda (potencial, corriente, presión y caudal de gases, temperatura, etc.), alcanzándose densidades de potencia (aproximadamente $0,5$

W/cm^2 a $1,2 A/cm^2$) del orden de las que se han informado internacionalmente para las mejores tecnologías [11].

APLICACIONES DE LAS TECNOLOGÍAS DE HIDRÓGENO

Generación descentralizada

Las plantas descentralizadas de generación de electricidad en base a fuentes primarias de energía renovables (eólica, solar, hidráulica, etc.) pueden tener aplicaciones de alto impacto económico-social en algunos países de la región latinoamericana de gran extensión territorial, particularmente Argentina, Brasil y México, como sistemas de abastecimiento de electricidad en zonas rurales o aisladas, distantes de las centrales eléctricas de base, si se tienen en cuenta las pérdidas de energía y el alto costo de capital asociados con la transmisión y distribución de electricidad por líneas de alta tensión. Pero cualquier diferencia diaria o estacional entre la generación de electricidad y su demanda ocasiona la necesidad de disponer de sistemas de almacenamiento de electricidad adecuados. De ahí, que las plantas generadoras de electricidad deben complementarse, como se ha señalado anteriormente, con baterías recargables avanzadas o bien derivando parte de la energía producida durante los periodos de baja demanda para electrolizar agua generando hidrógeno, el cual puede posteriormente reconvertirse en electricidad en celdas de combustible de alta eficiencia durante las horas de alta demanda, falta de luz o ausencia de viento. De este modo, las tecnologías de hidrógeno permiten resolver el problema del almacenamiento de las energías primarias y equilibrar el desfase entre generación y consumo.

Alternativamente, para generación dispersa, la tecnología de celdas de combustible puede utilizarse para cogeneración de electricidad, calor y vapor de agua, ya sea con fines industriales o para uso doméstico. En este caso, se admite el uso de otros combustibles, aparte del hidrógeno, tales como gas natural, biogas, metanol, etanol, cortes livianos de petróleo, los cuales deben ser previamente reformados. Al respecto, se debe señalar que en Argentina aproximadamente 250.000 viviendas carecen de estos servicios esenciales. En particular, en el interior de la provincia de Buenos Aires, existen aproximadamente cien mil personas en zonas rurales que no poseen electricidad proporcionada por el sistema interconectado nacional, lo cual resulta crítico en el caso de escuelas rurales. Dado que las distribuidoras de energía del interior de la provincia de Buenos Aires no están obligadas a energizar sin rentabilidad a poblaciones rurales, difícilmente el poblador de estas zonas pueda acceder a una educación y calidad de vida equivalentes a las del habitante de centros urbanos al faltarle los medios y equipamientos apropiados. Las energías renovables constituyen en este aspecto, alternativas limpias y eficientes para la generación de electricidad y calor en zonas rurales y/o aisladas.

Transporte vehicular

Es un hecho bien conocido que en ciudades densamente pobladas, una de las principales fuentes de contaminación ambiental está constituida por las emisiones (gases tóxicos y material particulado) provenientes de los escapes de los motores de combustión interna de los vehículos de transporte. Cada 160.000 km, el automóvil a gasolina promedio emite 1.300 kg de contaminantes orgánicos gaseosos, 1.250 kg de monóxido de carbono y 85 kg de óxidos de nitrógeno, más cantidades apreciables de material particulado. En este aspecto, la introducción gradual de sistemas de celdas de combustible de tecnología de avanzada para el reemplazo de los motores de combustión interna en la propulsión de vehículos, ofrece las ventajas de un alto rendimiento, funcionamiento silencioso y emisión nula de contaminantes (el producto de reacción es generalmente agua), contribuyendo así a la preservación del medio ambiente. Cabe también mencionar que la alta eficiencia de conversión de las celdas de combustible permite un aprovechamiento máximo de la energía química contenida en los combustibles (hidrógeno, biocombustibles, gas natural, etc.), asegurando de este modo el uso racional de los recursos.

La tecnología PEM de celdas de combustible se aplica ya en diversos vehículos eléctricos prototipo sin emisión de contaminantes fabricados por las principales compañías que dominan el mercado de automotores mundial. Si bien las celdas de combustible PEM han alcanzado un alto grado de desarrollo, la principal limitación para su aplicación masiva en el transporte vehicular está relacionada con el sistema de almacenamiento de hidrógeno. En el transporte vehicular no sólo importa la energía específica (kWh/kg) y, en este caso, la del hidrógeno es tres veces mayor que la de los hidrocarburos líquidos que constituyen la gasolina, sino también la densidad de energía volumétrica (kWh/l), ya que interesa el tamaño del tanque de combustible frente al tamaño total del vehículo. De ahí, que además de fabricarse modelos que usan como combustible hidrógeno comprimido a distintas presiones se ha ensayado también el empleo de hidrógeno líquido y de hidruros metálicos que poseen densidades de energía volumétrica mayores.

Alternativamente, se ha planteado el uso como combustible de alcoholes líquidos con alto contenido de hidrógeno, ya que, por ejemplo, el metanol tiene una densidad de energía volumétrica de $4,4 kWh/l$ frente a los $8,8 kWh/l$ de la gasolina, esto es, se requiere un tanque de almacenamiento sólo dos veces mayor. Por

otra parte, si el metanol, previo reformado, abastece una celda de combustible, la mayor eficiencia de conversión de este dispositivo, aproximadamente tres veces mayor que la de un motor de combustión interna, hace que para igual autonomía de recorrido sin recarga de combustible, el tanque de almacenamiento de metanol sea del orden o menor que el tanque de gasolina. Así, el vehículo prototipo Nekar 5 (con tecnología PEM de Ballard), desarrollado hace unos años, utiliza un sistema de celdas de combustible de 75 kW abastecidas con hidrógeno proveniente del reformado a bordo de metanol, y alcanza una velocidad máxima de 150 km/h. El tanque de almacenamiento de metanol es de sólo 40 litros, proporcionando una autonomía de 450 km, superior a la de un vehículo de combustión interna a gasolina. Por otra parte, emite menos del 10 % de las emisiones tóxicas de los motores de combustión interna.

De todos modos, para evitar algunos problemas asociados al uso de un reformador de metanol a bordo, otros fabricantes han privilegiado el desarrollo de vehículos eléctricos impulsados por celdas de combustible de muy alta eficiencia y alimentación directa con hidrógeno comprimido a alta presión. Al respecto, uno de los vehículos eléctricos que al momento exhibe el mejor rendimiento, es el Honda FCX, prototipo totalmente calificado para uso en ruta. Pesa 1.670 kg, su autonomía es de 430 km (hidrógeno a 350 bar) y desarrolla una velocidad máxima de 150 km/h. La fuente de potencia es una celda de combustible de 50 kW, con un volumen de 33 litros y un peso de 48 kg. El excelente rendimiento alcanzado se debe al empleo de una nueva membrana de electrolito tipo C-H con grupos sulfonato, con una conductividad eléctrica que es el doble de la de la clásica membrana de Nafion® a -20 °C. El bajo peso de la celda de combustible se ha logrado mediante la fabricación de placas separadoras de metal estampado que ofrecen una menor resistencia de contacto (1/4) y pesan un 20 % menos que las placas de carbón convencionales.

En la temporada 2008-2009 Honda ha lanzado al mercado, en California, una versión certificada de línea de producción, denominada FCX Clarity, que se puede arrendar por 3 años a u\$s 600/mes. La fuente de potencia es una celda de combustible de 100 kW de 57 litros de volumen y 67 kg de peso que proporciona una autonomía de 410 km y una velocidad máxima de 160 km/h. El vehículo también posee una batería de ion litio como fuente suplementaria de potencia para capturar la energía de la desaceleración y del frenado.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), a la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT), a la Comisión de Investigaciones Científicas (CIC PBA) y a la Universidad Nacional de La Plata (UNLP) por la financiación recibida.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Q. Schiermeier, J. Tollefson, T. Scully, A. Witze y O. Morton, *Nature*, **454**, 816 (2008).
2. A. Züttel, *Materials Today, Review Features*, **24-23** (2003).
3. W. E. Triaca, H. A. Peretti, H. L. Corso, A. Bonesi y A. Visintin, *Journal of Power Sources*, **113**, 151 (2003).
4. D.R. Barsellini, A. Visintin, W.E. Triaca y M.P. Soriaga, *Journal of Power Sources*, **124**, 309 (2003).
5. A. Visintin, H.A. Peretti, F. Ruiz, H.L. Corso y W.E. Triaca, *Journal of Alloys and Compounds*, **428**, 244 (2007).
6. M. Melnichuk, N. Silina, G. Andreasen, H.L. Corso, A. Visintin y H.A. Peretti, *International Journal of Hydrogen Energy*, **35**, Issue 11, 5855, (2010)
7. S. Srinivasan, *Fuel Cells: From Fundamentals to Applications*, Springer, New York (2006).
8. J.P. Meyers, *Interface*, **17**, 36 (2008).
9. S.G. Ramos, M.S. Moreno, G.A. Andreasen y W.E. Triaca, *International Journal of Hydrogen Energy*, **35**, Issue 11, 5925, (2010)
10. G. Andreasen, D. R. Barsellini, A. Visintin y W.E. Triaca, *World Hydrogen Technologies Convention 2007, Proceedings WHTC 2007, Montecatini, Italia*.
11. C. Tori, M. Baleztena, C. Peralta, R. Calzada, E. Jorge, D.R. Barsellini, G. Garaventa, A. Visintin, y W.E. Triaca, *International Journal of Hydrogen Energy*, **33**, 3588 (2008).