

Contribuciones cubanas al empleo del dihidrógeno como fuente de energía renovable

Cuban contributions to the development of hydrogen as renewable energy source

M.Sc. Noeldris López-López^{1*}

¹Facultad de Química, Universidad de La Habana, Cuba.

*Autor para la correspondencia. correo electrónico: noe@fq.uh.cu

RESUMEN

El impacto negativo generado por el sistema energético vigente, exige la concepción de un nuevo modelo que minimice los daños al medio ambiente. Con este propósito en las últimas décadas se han concentrado importantes recursos para la investigación y el desarrollo de fuentes renovables de energía. Entre ellos el dihidrógeno (H₂) ha recibido especial atención, como vector energético capaz de cumplir una función similar a la que en nuestros días cumple el petróleo. El presente trabajo resume las principales contribuciones de investigadores e instituciones cubanas al desarrollo de esta fuente energética, resaltando los aportes nacionales en función de adecuar la producción, el almacenamiento y el consumo de dihidrógeno a las condiciones existentes en nuestro país. El análisis de los resultados alcanzados hasta fecha, sugiere la necesidad de estrechar los vínculos entre la industria básica y la academia para mantener una vigilancia tecnológica activa respecto al avance de este sector energético.

Palabras clave: dihidrógeno; energía renovable; contribuciones cubanas.

ABSTRACT

Faced with the need to replace fossil fuels, hydrogen has been considered a promising secondary source of clean energy. This work summarizes the main Cuban contributions to the development of this energy source, highlighting the national alternatives to adapt its production and consumption to the existing conditions in our country. The analysis of the results reached up to date, suggests the need to enhance the links between the basic industry and the academy to support a technological active vigilance with regard to the advance of this energetic vector.

Keywords: hydrogen; renewable energy; Cuba's contribution.

Recibido: 8/6/2018

Aprobado: 20 /10/2018

Introducción

El petróleo, por su facilidad de extracción, transporte y almacenamiento, es desde la Segunda Revolución Industrial, el combustible que más ha contribuido al desarrollo de la humanidad. Sin embargo, más de un siglo de explotación intensiva de este recurso, ha generado dos de los problemas medioambientales de mayor impacto que afectan a nuestro planeta: el efecto invernadero y el calentamiento global. En este contexto el empleo de dihidrógeno aparece como una alternativa para producir energía, sin afectar al medio ambiente.

Aunque el hidrógeno forma parte de numerosos compuestos, no puede ser un sustituto inmediato de los combustibles fósiles debido a que debe ser manufacturado, razón por la cual no puede considerarse una fuente de energía renovable, sino una fuente secundaria de energía limpia. No obstante, posee la ventaja de que puede ser producido y

almacenado para su posterior consumo. De ahí que un reto importante para el desarrollo de la tecnología del hidrógeno, además de garantizar su producción eficientemente a gran escala, es lograr almacenarlo de forma compacta y segura.⁽¹⁾

Los métodos que se conocen para producirlo de manera abundante y barata, están igualmente en proceso de desarrollo, pero en todos los casos se requiere de una energía inicial para descomponer las moléculas de agua o de metano, y separar el dihidrógeno del oxígeno y del carbono en estos compuestos. Sin embargo, su puesta en práctica constituye una alternativa viable para eliminar o reducir las emisiones de dióxido de carbono.

La apuesta por el uso del dihidrógeno como “el combustible del futuro”, que permita mantener la capacidad de generación de energía y transporte requerida por la sociedad moderna, debe resolver aún numerosas dificultades técnicas, económicas y sociales. Su empleo requiere tecnologías avanzadas y no está exento de serios riesgos en su uso cotidiano, pero posee un elevado calor de combustión (572 kJ/mol) y es compatible con el medio ambiente, debido a que su único producto de combustión es el agua.⁽²⁾

Las aplicaciones móviles que emplean dihidrógeno son ya una realidad en Estados Unidos, Japón y Europa. Países de la región como Brasil y Argentina también explotan este portador energético. El presente trabajo tiene como objetivo esbozar el aporte de investigadores cubanos al empleo del dihidrógeno como fuente de energía limpia, y a su vez, de mostrar la necesidad de crear proyectos nacionales que permitan el desarrollo futuro de este combustible en Cuba.

Desarrollo del tema

Contribuciones nacionales al desarrollo del dihidrógeno como fuente de energía renovable

En 1839, el galés William Grove, generó por primera vez energía a partir del dihidrógeno obteniendo agua, electricidad y calor. Pasados más de cien años, Francis T. Bacon en 1959 mejoró el diseño de los catalizadores de platino que empleaban las primeras celdas de

dihidrógeno y sugirió el empleo del ácido sulfúrico como electrolito, además de usar electrodos de níquel. En la década de 1960, la NASA empleó este sistema de energía para alimentar las misiones Geminis, Apollo, y posteriormente el Skylab y el Transbordador Challenger. Ya en 1993, surgen los primeros autobuses movidos por dihidrógeno. A partir de este momento diferentes empresas automotrices empiezan a trabajar en autobuses y automóviles impulsados por celdas combustibles, cada una con un sistema de celdas cada vez más potentes.⁽³⁾

En Cuba, la experiencia en el uso del dihidrógeno se inició con la construcción de las primeras centrales termoeléctricas, donde se produce mediante el reformado catalítico de hidrocarburos fósiles, para ser empleado en los sistemas de enfriamiento de los generadores. Esta práctica, si bien resulta contaminante para el medio ambiente, ha permitido crear las bases para su empleo seguro, así como la formación de un personal capacitado en el manejo de dicho gas.

El empleo de dihidrógeno como fuente renovable de energía en Cuba comenzó a documentarse a finales de los setenta del pasado siglo. El primer “Grupo del Hidrógeno” reunía a ingenieros y académicos de diversas ramas de la ciencia cuyas investigaciones estaban encaminadas al desarrollo de este proyecto. Desde entonces no se ha dejado de investigar en el tema. Las contribuciones nacionales versan sobre el desarrollo de alternativas para adecuar su producción, almacenamiento y aprovechamiento a las condiciones existentes en nuestro país.

Aunque actualmente el programa nacional de energía renovable hasta el 2030 (Decreto-Ley 345 2017), no incluye explícitamente el empleo de este combustible alternativo a corto plazo, muchas instituciones científicas realizan investigaciones dedicadas al desarrollo de este sector. Entre ellas podemos mencionar: la Facultad de Química, el Instituto de Ciencia y Tecnología de Materiales (IMRE) y el Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas (InSTEC) pertenecientes a la Universidad de La Habana. Importantes contribuciones han realizado el Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables (CETER – CUJAE), así como la Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas y la Universidad de Oriente. Se destacan igualmente organizaciones gubernamentales como el Centro cubano de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables (CUBAENERGÍA) y CUBASOLAR. Los progresos de estas investigaciones se socializan entre

expertos cubanos y foráneos en el “Taller Internacional de Hidrógeno como combustible alternativo”, que se celebra en la capital cada dos años en el marco de la Conferencia Internacional de Energía Renovable, Ahorro de Energía y Educación Energética.

Alternativas cubanas para la obtención de dihidrógeno

El escenario energético cubano no incluye actualmente ningún modelo de generación que involucre al dihidrógeno.^(4,5) El primer paso para su establecimiento como fuente energética en el país, depende de la posibilidad de desarrollar un método que permita obtenerlo de manera rentable, a partir de materias primas renovables y sin afectaciones al medio ambiente. En este sentido la obtención de dihidrógeno a partir del reformado del bagazo de caña de azúcar aparece como una alternativa económicamente favorable, que permite a la par, la diversificación y la sostenibilidad de la industria azucarera cubana.

La producción de caña de azúcar en Cuba asciende aproximadamente a 1,5 millones de toneladas anuales, de las cuales casi el 50 % es bagazo y residuos agrícolas con elevado potencial para la producción de energía y otros compuestos químicos. De igual manera sería posible utilizar los residuos generados por el sector agrícola y ganadero, así como los desechos de la industria y la sociedad. La eficiencia en el aprovechamiento de los mismos a escala local mediante su conversión a gas de hidrógeno sería muy superior, gracias al elevado calor de combustión de este último en comparación con el calor de combustión de la materia orgánica que los compone.⁽⁶⁾

Arteaga *et al.* han estudiado la termodinámica del proceso de reformado de la biomasa cañera. Para ello desarrollaron un modelo matemático que permite predecir el comportamiento electroquímico de una unidad gasificadora integrada a una celda de combustible de óxido sólido, alimentada por el dihidrógeno producido mediante la gasificación del bagazo de la caña de azúcar y la cáscara de arroz. El modelo considera el efecto de la temperatura sobre el equilibrio, la conversión a carbón, las pérdidas de calor, el retiro de alquitrán en el gasificador y la conversión de dihidrógeno dentro de los electrodos de pila. En las condiciones propuestas por los autores se alcanza una eficiencia energética del 58,85 %.⁽⁷⁾

Otra posible contribución de la industria azucarera consiste en convertir la energía remanente de los centrales para la producción de dihidrógeno mediante la electrólisis de agua. Valdés ha estudiado la factibilidad de este proceso. Los cálculos demuestran que la cantidad de energía eléctrica que se genera en una fábrica de azúcar de caña, es suficiente para cubrir sus propias necesidades y que se puede obtener una cantidad adicional para generar dihidrógeno. Empleando solo una parte de la energía eléctrica producida en la generación de este, sería posible satisfacer totalmente las necesidades de combustible para la transportación de la caña.⁽⁸⁾

La producción nacional de dihidrógeno pudiera incrementarse mediante el reformado catalítico del etanol. La principal ventaja de este proceso está soportada en sus características renovables como parte de un ciclo natural, así como las facilidades para la manipulación, el transporte, la biodegradabilidad y la no emisión de CO₂ mediante el empleo de este recurso. La conversión de etanol en dihidrógeno puede ser representada por cuatro etapas. En un primer momento se mezcla el etanol con cantidades apropiadas de agua, ocurre la vaporización de la mezcla, que luego se calienta hasta alcanzar las condiciones apropiadas para el proceso de reformado. La eficiencia de la conversión resulta altamente dependiente de la formulación de los catalizadores empleados, y de condiciones de reacción como la relación molar etanol/H₂O, la presión del sistema y la temperatura de trabajo.⁽⁹⁾

La simulación de la producción de dihidrógeno a partir de bioetanol purificado para una celda tipo PEM (Polymer Electrolytic Membrane), fue realizada por Guinta *et al.* Ellos proponen como condiciones óptimas para lograr una conversión del 100 % del etanol en H₂ y CO una temperatura de 973 K y una relación molar de 3,5:1etanol/H₂O empleando como catalizadores Pt o Au.⁽¹⁰⁾ Autores foráneos obtuvieron en condiciones similares los resultados prácticos esperados, y demostraron la mayor factibilidad de emplear níquel soportado sobre óxidos metálicos como catalizador, para obtener elevados porcentajes de conversión a menor costo.⁽¹¹⁾

Romero *et al.* reportan la influencia de las condiciones de activación de óxidos ternarios para la catálisis del proceso de obtención de dihidrógeno, mediante el reformado catalítico del etanol. En este caso los óxidos son obtenidos por calcinación de hidróxidos dobles laminares de Ni(II)–Mg(II)–Al(III). Se propone este sistema con el objetivo de

prevenir la formación indeseada de carbón que acompaña el proceso de reformado del etanol, debido a que la presencia de Mg(II) evita la formación de este indeseable subproducto.⁽¹²⁾

Entre los métodos más explotados, la electrólisis del agua es uno de los pocos que puede ser utilizado en una producción de dihidrógeno a escala industrial; pero su elevado costo de producción llama a disminuir las altas temperaturas de trabajo mediante el empleo de electrocatalizadores más eficientes. Jiménez *et al.* han obtenido y caracterizado electrodos sobre la base Ni/Al₂O₃ para las reacciones de desprendimiento de dihidrógeno. La electrodeposición del composito se realizó en un baño de níquel Watts empleando sulfato de níquel (II), ácido bórico y cloruro de níquel(II) a pH ligeramente ácido. La temperatura de trabajo fue de 60 °C, el tiempo de electrólisis es alrededor de 80 min para obtener una capa del material de varios micrómetros de espesor. La densidad de corriente se fijó en 20 mA/cm², y se utilizó alúmina en polvo (Al₂O₃) con un diámetro de partícula de 3,75 mm. De acuerdo a la caracterización realizada, el material resultante exhibió las características superficiales necesarias para ser empleado en el proceso de obtención del gas.⁽¹³⁾

Con un propósito similar, Peláez *et al.* obtuvieron electrodos Ni/Fe con un 69 % de Ni prácticamente libres de impurezas de Cu, y estudiaron la cinética de la reacción de desprendimiento de dihidrógeno. El electrodo se obtuvo mediante el proceso de electrodeposición galvanostática a partir de un baño galvánico de acetato de níquel(II) y sulfato de hierro(II) en medio ácido. Las curvas de polarización a temperatura ambiente, confirmaron que la aleación obtenida presenta un bajo sobrepotencial del orden de 250 mV para una corriente de 135 mA, y en general exhiben un comportamiento electrocatalítico superior al del electrodo tradicional de Fe.⁽¹⁴⁾

Otros científicos sugieren que en un futuro cercano, la combinación de distintos tipos de fuentes renovables para la obtención de energía limpia, será justamente el método más difundido. Carbonel *et al.* exponen las perspectivas del empleo de fuentes renovables ya establecidas en nuestro territorio, como la eólica y la solar, para producir dihidrógeno, haciendo énfasis en las ventajas de aprovechar la energía fotovoltaica para llevar a cabo la electrólisis del agua. Igualmente establece como una alternativa eficiente el desarrollo de sistemas integrados que combinan la energía proveniente de distintas fuentes

renovables para la producción de dihidrógeno, acoplados a un sistema que permite su conversión en energía *in situ* y, en función del diseño, su almacenamiento en condiciones apropiadas.⁽¹⁵⁾

Almacenamiento de dihidrógeno

Uno de los principales retos para el establecimiento de la tecnología del hidrógeno es encontrar una forma eficiente de almacenamiento y descarga, de manera que este pueda ser empleado con seguridad en aplicaciones móviles como el transporte, que requiere de su almacenamiento en el sitio de empleo. En sus inicios, la forma más comúnmente empleada en autos fue el H₂ licuado. Este tiene el reducido valor de densidad de 70 g/L. La licuefacción del H₂ tiene lugar a una temperatura extremadamente baja (20 K), que no puede ser suministrada por ninguno de los fluidos criogénicos comunes, como el dinitrógeno líquido (77 K). Esto implica un gasto energético para su licuefacción, equivalente al 40 % de la energía que se generará. Su almacenamiento en el sitio de empleo está limitado además, por su evaporación continua.⁽¹⁾

El segundo método más empleado es en forma de gas comprimido a altas presiones, 700 bar (700 veces la presión atmosférica normal). Mediante este método se cargan los tanques de dihidrógeno que emplean las aplicaciones móviles comerciales, y el dihidrógeno alcanza una densidad de 42 kg / m³, en comparación con 0,090 kg / m³ en condiciones de presión y temperatura normales. A esta presión, 5 kg de H₂ se pueden almacenar en un tanque de 125 L, y permiten a estos vehículos una autonomía de algo más de 500 km. Los tanques para el almacenamiento son caros, deben soportar altas presiones, y a la vez ser herméticos para evitar fugas de dihidrógeno, que es el gas más volátil conocido (se escapa unas 2,8 veces más rápido que el gas natural). En general se emplea fibra de carbono y materiales compuestos, como mezclas con resina epóxica, para elevar la resistencia sin que pese demasiado, pero aún así el tanque de un auto de pila de combustible de dihidrógeno suele pesar alrededor de los 100 kg.⁽¹⁶⁾

Ante esta situación, la adsorción física de dihidrógeno sobre materiales porosos, se ha presentado como una de las alternativas más promisorias en los últimos años, ya que se trata de un procedimiento reversible y viable desde el punto de vista cinético, que tiene

lugar sin necesidad del empleo de altas temperaturas. Sin embargo, los resultados reportados hasta el momento, se encuentran aún muy lejos de llegar a la meta propuesta por el Departamento de Energía de los Estados Unidos (D.O.E.), de un 9 % en masa de H₂ adsorbido, a una temperatura próxima a la ambiente y condiciones seguras de presión.⁽¹⁷⁾

Respecto al almacenamiento, en el Instituto de Ciencia y Tecnología de Materiales (IMRE), se han obtenido materiales del tipo cianuro metalatos capaces de almacenar dihidrógeno, aunque todavía por debajo de los requerimientos tecnológicos. Entre ellos se destacan análogos de Azul de Prusia^(18,19), nitroprusiatos metálicos⁽²⁰⁾ y hexacianurometalatos tipo zeolita.⁽²¹⁾ Los mayores valores de capacidad gravimétrica y entalpía de adsorción reportados hasta el momento para este tipo de materiales corresponden a estructuras que contienen iones de transición con esfera de coordinación insaturada. Tal es el caso de los hexacianurocobaltato(III) y hexacianuroiridato(III) de cobre(II), que alcanzan los 2,6 y 2,4 % en peso de dihidrógeno molecular almacenado respectivamente a 586 Torr y 75 K.⁽²²⁾

El costo elevado de los reactivos precursores impide que estos materiales constituyan una alternativa práctica. Sin embargo, el estudio de los mismos ha permitido conocer la influencia de los de metales intercambiables⁽²³⁾ y de la naturaleza del bloque molecular presentes en su estructura sobre el proceso de adsorción de dihidrógeno.⁽²⁴⁾ Para su obtención el grupo ha desarrollado una metodología propia, basada en el método de coprecipitación química con posterior recristalización solvotermal en condiciones variables de pH y temperatura, que permite obtener una amplia variedad estructural para materiales adsorbentes de igual composición.⁽²⁵⁾

Recientemente, Reguera *et al.* han estudiado la capacidad de absorción de carbones activados producidos a partir de carbón mineral, con área superficial de 3 000 m² g⁻¹. El registro de las isothermas a -196 °C muestra una capacidad de un 6,8 % en peso de dihidrógeno adsorbido, que resulta independiente del contenido de dióxígeno inicial presente en los carbones.⁽²⁶⁾

Desarrollo de celdas de combustible

La conversión de la energía química de dihidrógeno en electricidad, se realiza de manera eficiente con las pilas de combustible en una amplia gama de industrias, incluyendo la automotriz. Las pilas constan de dos electrodos, un ánodo y un cátodo, cuya composición depende del tipo de celda en cuestión. El dihidrógeno fluye hacia el ánodo donde un catalizador facilita su conversión en electrones y protones (H^+). Estos últimos atraviesan la membrana electrolítica para combinarse con el dióxígeno y los electrones en el lado del cátodo, reacción catalizada generalmente por el platino. Los electrones, que no pueden atravesar la membrana de electrolito, fluyen del ánodo al cátodo a través de un circuito externo y alimentan los dispositivos eléctricos. Una sola celda electroquímica produce aproximadamente un voltio. Para aplicaciones de potencia se apilan muchas de estas celdas para formar la pila de combustible, cuyo voltaje aumenta en proporción al número de celdas apiladas.⁽²⁷⁾

Existe una gran variedad de pilas de combustible diseñada para disímiles aplicaciones en función de la temperatura de trabajo de las mismas. Para bajas temperaturas las más utilizadas son las pilas de Membrana de Polímero Sólido/Proton Exchange Membrane (PEM), empleadas en la automoción por presentar una buena relación potencia/volumen, elasticidad y rápido arranque, pero necesitan catalizadores caros y son muy sensibles a las impurezas presentes en los gases. Existen otras como las Alcalinas (AFC), que utilizan como electrolito hidróxido de potasio y son empleadas por la NASA en sus cohetes y transbordadores. Están también las de Metanol Directo (DM) que se emplean mayormente en electrónica. Para aplicaciones de temperatura media las más comercializadas son las de Ácido Fosfórico, utilizadas en plantas eléctricas estacionarias de hospitales, aeropuertos y otros centros de emergencia, estas emplean platino como catalizador. Mientras que entre las pilas de temperatura alta se encuentran las de Carbonato fundido que consumen combustibles basados en hidrocarburos; y las pilas de Óxido Sólido (SO), en las que el electrolito se sustituye por un material cerámico, favoreciendo su funcionamiento a elevadas temperaturas. Todas requieren una alta tecnología.⁽²⁸⁾

En cuanto a la conversión de dihidrógeno en energía mediante las pilas de hidrógeno, autores cubanos han llevado a cabo la modelación tridimensional y estacionaria de una celda de combustible de intercambio protónico, empleando técnicas computacionales

para la modelación de la dinámica de los fluidos.⁽²⁹⁾ Vázquez *et al.* han diseñado una celda de combustible con membrana de intercambio de protones alimentada con H₂ parcialmente purificado (contaminado con CO) y O₂ del aire. El catalizador empleado en la celda propuesta está conformado por nanopartículas de oro recubiertas con platino, soportadas sobre carbón Vulcan XC-72R y tiene ventaja de que puede ser utilizado en ambos compartimientos. En el compartimiento anódico se emplea para la reacción de oxidación del dihidrógeno, con el objetivo de aumentar la vida útil del catalizador en presencia de CO. En el compartimiento catódico puede ser usado, y a que se ha comprobado que este material es un excelente catalizador de la reacción de reducción del dióxígeno.⁽³⁰⁾

Aunque hay estudios teóricos, aún no se ha fabricado aún en Cuba una celda de combustible. En general, las publicaciones respecto al tema y la experiencia práctica sobre el empleo del hidrógeno como fuente de energía son insuficientes, razón por la cual el hidrógeno no aparece como opción dentro de los lineamientos energéticos nacionales.

Dirigido por el Centro de Investigación y Manejo Ambiental del Transporte (CIMAB) y en colaboración con el CETER, se desarrolló recientemente un proyecto mediante el cual se insertaba un generador HHO (Hydrogen-Hydrogen- Oxygen) en un vehículo con motor de combustión interna de cuatro tiempos.⁽³¹⁾ Este generador permite mediante un proceso electroquímico la obtención de mezclas gaseosas de dihidrógeno y dióxígeno que llegan de conjunto con la gasolina a la cámara de combustión. La combustión del dihidrógeno genera parte de la energía para su funcionamiento, favoreciendo el ahorro de combustibles hidrocarbonados y la disminución de emisiones de gases tóxicos al ambiente.

De acuerdo a experiencias reportadas por autores foráneos, el equipo generador de HHO empleado permitiría un ahorro del 30 % de combustible.⁽³²⁾ Parecía una solución apropiada en nuestras condiciones, ya que los beneficios esperados no dependían de la construcción de las llamadas pilas de hidrógeno. Sin embargo, los resultados obtenidos no fueron favorables y la práctica llevó a renunciar al proyecto.

Posición de Cuba respecto al empleo del dihidrógeno como combustible

La posición de Cuba respecto al hidrógeno es de vigilancia tecnológica. Los decisores han apostado por tecnologías energéticas consolidadas como la fotovoltaica y la eólica, favorecidas además por nuestras condiciones climáticas de isla tropical. En la actualidad el empleo de hidrógeno como combustible no supone una alternativa práctica por ser una tecnología muy costosa. Muchos países, incluso del primer mundo, esperan a que los líderes tecnológicos desplieguen y abaraten la tecnología necesaria para luego adaptarla a sus condiciones particulares. En tanto, llevan a cabo investigaciones y van formando personal capacitado para ello.

Iniciando el nuevo siglo, el aumento considerable de los precios del petróleo desencadenó importantes inversiones en este campo. Sin embargo, la caída del precio del mismo durante la última década, condujo inevitablemente al frenado de los avances en investigación y desarrollo que se venían registrando respecto al hidrógeno a escala internacional. Igualmente, en Cuba se le ha prestado menos atención al hidrógeno en los últimos años. Son pocos los proyectos de ciencias básicas que vinculan a la academia con la industria para el impulso de esta tecnología, cuestión de importancia vital. Nuestras limitaciones no son solo tecnológicas o económicas, falta conciencia respecto a las ventajas que supone el aprovechamiento del hidrógeno para la industria azucarera y para la generación energética en general.

Por otra parte, en contra de sus innegables ventajas ambientales, la tecnología del hidrógeno tiene la particularidad de que necesita progresar como un todo. Es imprescindible para generar hidrógeno limpio en los centrales azucareros cubanos, desarrollar un sistema de almacenamiento seguro y celdas fabricadas con materiales económicos que permitan aprovecharlo eficientemente en dicho contexto, así como crear las condiciones para que estos centrales puedan entregar su carga energética a la red nacional.

Conclusiones

Si bien en el contexto nacional no pocos colectivos científicos investigan temas relacionados con la producción, el almacenamiento y aprovechamiento del hidrógeno con

vistas a su uso como fuente de energía limpia, es importante continuar divulgando las potencialidades del empleo de este gas como portador energético en Cuba. Igualmente es prioritario incentivar los vínculos entre la industria básica y la academia para aumentar el número de investigaciones experimentales que conlleven a buscar alternativas adecuadas a las condiciones existentes en el país, así como el uso de otras tecnologías renovables, como la fotovoltaica, en la obtención de este combustible.

Considerando el hecho de que el dihidrógeno constituye una fuente secundaria de energía, es imprescindible el desarrollo y la consolidación de otras fuentes renovables que permitan la obtención limpia del mismo. Pero si se tiene en cuenta el creciente desarrollo de la tecnología del hidrógeno a escala global, es necesario mantener una vigilancia tecnológica activa, de forma tal que las investigaciones en el tema no queden rezagadas respecto a otras correspondientes a tecnologías renovables más extendidas en la actualidad.

Agradecimientos

Por compartir su experiencia y sus conocimientos respecto al tema en cuestión, a los doctores: Elena Vigil Santos, Antonio Valdés Delgado y José M. Villarroel Castro.

Referencias bibliográficas

1. U.S. Department of Energy. Fuel cell technologies office multi-year research, development, and Demonstration plan-hydrogen Production, 2015. 2015
2. WHITE C. M. "The hydrogen-fueled internal combustion engine: a technical review". *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016, **31**(10), 1292-1305. ISSN: 0360-3199
3. VALERO, J. "La economía del hidrógeno". *Revista Internacional de Sociología (RIS)*. 2010, **68** (2), 429-452. ISSN: 0034-9712
4. SUÁREZ, J. A.; BEATÓN, P. A. "Estado y perspectivas de las energías renovables en cuba". *Tecnología Química*, 2007, **27**(3), 75-82. ISSN: 0041-8420.

5. BRAVO, D. "Energía y desarrollo sostenible en Cuba". *Centro Azúcar*.2015, **42**(4), 14-26. ISSN 0253-5777
6. ARTEAGAPÉREZ, L.E. *et al.* "Termoconversión de residuos sólidos de la industria azucarera para incrementar la sostenibilidad de los procesos". *Centro Azúcar*, 2014, **41** (1), 1-11. ISSN: 0253-9268.
7. ARTEAGAPÉREZ, L. E.; CASASLEDÓN, Y.; PÉREZBERMÚDEZ, R. "Energy and exergy analysis of a sugar cane bagasse gasifier integrated to a solid oxide fuel cell based on a quasi-equilibrium approach". *Chemical Engineering Journal*.2013, **228**, 1121–1132. ISSN: 1385-8947
8. VALDÉS DELGADO, A. "La generación y uso del hidrógeno para el suministro de caña a la industria azucarera". *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*. 2015, **49** (3), 34-36. ISSN: 0138-6204.
9. MENG, D.; LEUNG, Y.C.; LEUNG, M. "A review on reforming bio-ethanol for hydrogen production". *International Journal of Hydrogen Energy*. 2007, **32**, 3238 – 3247. ISSN: 0360-3199
10. GIUNTA, P. *et al.* "Simulation of a hydrogen production and purification system for a PEM fuel-cell using bioethanol as raw material". *Journal of Power Sources*, 2007, **164**, 336–343. ISSN: 0378-7753
11. FATSIKOSTA, A. *et al.* "Production of hydrogen for fuel cells by reformation of biomass-derived ethanol". *Catalysis Today*. 2002, **75**, 145-155. ISSN: 0920-5861.
12. ROMERO, A. *et al.* "Ni(II)–Mg(II)–Al(III) catalysts for hydrogen production from ethanol steam reforming: Influence of the activation treatments". *Catalysis Today*. 2010, **149**, 407–412. ISSN: 0920-5861.
13. JIMÉNEZ, J. *et al.* "Obtención por vía electroquímica de electrodos *composite* sobre la base de níquel para el desprendimiento de hidrógeno". Recuperado de <http://www.cubasolar.cu/Biblioteca/Ecosolar/Ecosolar02/HTML/Articulo07.htm>. Consultado: 16 de julio de 2018.
14. PELÁEZ, E.; VALDÉS, M.; GONZÁLEZ, E. R. "Características cinéticas de la reacción de desprendimiento de hidrógeno en el electrodo de aleación Ni-Fe". *Revista CENIC Ciencias Químicas*. 2005, **36** (2). ISSN: 1015-8553.
15. CARBONELL, T.; ROCA, V.; FERNÁNDEZ, L. "Hydrogen from Renewable Energy in Cuba". *Energy Procedia*.2014, **57**, 867 – 876. ISSN: 1876-6102.

16. IBÁÑEZ, J. El coche de hidrógeno no es solo humo. Recuperado de <https://www.xataka.com/automovil/el-coche-de-hidrogeno-no-es-solo-humo-estos-son-sus-retos>. Consultado el 12 de julio de 2018.
17. REGUERA, E. "Almacenamiento de hidrógeno en nanocavidades". *Rev. Cub. Física*, 2009, **26** (1), 3-14. ISSN: 0253-9268.
18. AVILA, M. "Porous framework of $T_2[Fe(CN)_6] \cdot xH_2O$ with $T=Co, Ni, Cu, Zn$, and H_2 storage". *Journal of Solid State Chemistry*. 2008, **181** (11), 2899-2907. ISSN: 0022-4596.
19. KRAP, C. P. *et al.* "Hydrogen Storage in Prussian Blue analogues: H_2 Interaction with the Metal Found at the Cavity Surface". *Energy Fuels*. 2010, **24**, 581–589. ISSN 0887-0624.
20. REGUERA, L. *et al.* "Hydrogen Storage in Porous Transition Metals Nitroprussides". *J. Phys. Chem. C*. 2008, **112**, 10490–10501. ISSN: 1932-7447.
21. REGUERA, L. *et al.* "Hydrogen Storage in Porous Cyanometalates: Role of the Exchangeable Alkali Metal". *J. Phys. Chem. C*, 2008, **112**, 5589-5597. ISSN: 1932-7447.
22. REGUERA, L. *et al.* "Hydrogen Storage in Copper Prussian Blue Analogues: Evidence of H_2 Coordination to the Copper Atom". *J. Phys. Chem. C*. 2008, **112**, 15893–15899. ISSN: 1932-7447.
23. REGUERA, L. "High density hydrogen storage in nanocavities: Role of the electrostatic interaction". *International Journal of Hydrogen Energy*. 2010, **35**(23), 12864-12869. ISSN: 0360-3199.
24. REGUERA, L. *et al.* "Hydrogen Storage in Zeolite-Like Hexacyanometallates: Role of the Building Block". *J. Phys. Chem. C*. 2008, **112**, 17443–17449. ISSN: 1932-7447
25. REGUERA, L. *et al.* "Synthesis, Crystal Structures, and Properties of Zeolite-Like $T_3(H_3O)_2[M(CN)_6]_2 \cdot uH_2O$ ($T = Co, Zn$; $M = Ru, Os$)". *Eur. J. Inorg. Chem.* 2017, **2017**(23), 2980–2989. ISSN: 1434-1948
26. Tellez, M.C. *et al.* "Hydrogen storage in activated carbons produced from coals of different ranks: Effect of oxygen content". *International Journal of Hydrogen Energy*. 2014, **39**(10), 4996-5002. ISSN: 0360-3199
27. PIERRE, F. Fuel Cell and Hydrogen technologies in Europe Financial and technology, Outlook on the European sector ambition 2014- 2020. NEW-IG Board. Bruselas. Recuperado de <https://hydrogeneurope.eu/>. Consultado el 11 de julio de 2018.

28. KIRUBAKARAN, A. *et al.* "A review on fuel cell technologies and power electronic interface". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2009, **13** (9), 2430-2440. ISSN: 1364-0321
29. DE LA TORRE, R.; GONZÁLEZ, D.; GARCÍA, L.R. "Análisis y optimización de una celda de combustible de membrana de intercambio protónico". *Ingeniería Energética*. 2015, **36**, 113-124. ISSN 1815 – 5901.
30. VÁZQUEZHUERTA, G. *et al.* "Desarrollo de una celda de combustible tipo PEM alimentada con oxígeno del aire e hidrógeno parcialmente purificado". *Revista Cubana de Química*. 2012, **24** (3), 212-214. ISSN: 0258-5995.
31. RODRÍGUEZ, J. M. "Influence of addition of hydrogen produced on board in the performance of a stationary diesel engine". *International Journal of Hydrogen Energy*. 2018, **43** (37), 17889-17897. ISSN: 0360-3199
32. DE SILVA T.S.; SENEVIRATHNE, L.; WARNASOORIYA, T.D. HHO Generator "An Approach to Increase Fuel Efficiency in Spark Ignition Engines". *European Journal of Advances in Engineering and Technology*. 2015, **2** (4), 1-7. ISSN: 2394 - 658X