

# Hidrógeno: el futuro distante de la energía, nunca más

**José Carlos Carrillo-Martínez  
Edén Oceguera-Contreras**

El término de energía por hidrógeno ha sido muy sonado en nuestra época, ya sea por su utilización en celdas de combustible o en referencia a la combustión de ese elemento con fines de obtención de energía. Todos hemos escuchado de esta nueva solución que para la mayoría es un concepto futurista, pero se ignora que representa un verdadero cambio con respecto a la energía basada en carbón. La verdad es que, aunque la mayoría de la gente lo desconozca, en el mundo hay muchos proyectos que tienen que ver con el uso de hidrógeno como una fuente de energía verde de tipo cero emisiones. Cada día las compañías automotrices parecen apostar más hacia esta alternativa; inclusive, en 2014, se fundó Nikola Motors, una compañía dedicada a los autos eléctricos con modelos adaptados al uso de hidrógeno como fuente principal de energía.

Proyectos que en una época sonaban a ciencia ficción (energía por basura, insulina en aerosol, etc.) son hoy en día una realidad: proyectos de obtención de biogases como metano o hidrógeno a partir de microorganismos, una de las apuestas biotecnológicas más sustentables en la actualidad. Estamos hablando de energía brindada por la naturaleza, así como la eólica o la energía solar.

¿Cuál es la necesidad de buscar fuentes de energía tipo cero emisiones como el hidrógeno? La verdad es que



© Itziar Aretxaga. Lobo marino californiano (*Zalophus californianus*). Isla Espíritu Santo, Mar de Cortés, Baja California Sur.

la sobreexplotación de combustibles fósiles es un problema que ya está en un punto sin retorno, en el que acciones ambientalistas como cambiar tu bombilla por una ahorradora o reciclar tu basura son ideas superfluas; piensa en esto, si crees que apagar las luces mientras no las usas es una forma de ahorrar energía y salvar el medio ambiente, déjame decirte que en realidad lo único que ahorras es tu dinero, las centrales eléctricas que producen la energía que se distribuye a las casas están quemando combustibles fósiles de forma continua para su operación, así que tal vez no cierres el circuito para que se distribuya la energía a tu casa y no influyas en la quema de más combustible para satisfacer la demanda energética, pero la verdad es que aún no son suficientes las personas con la idea de ahorrar energía o usar fuentes alternas para realmente producir un impacto en la disminución de la quema de combustibles; pero descuida, no es tu culpa, es un problema en el que incluso las acciones de los gobiernos no están siendo

muy eficaces. Nuestra dependencia energética está haciendo que busquemos fuentes extras de carbón y gas de una manera descontrolada y nos está llevando a contaminar importantes cuencas hidrológicas. Asimismo, la sobreexplotación de recursos y la destrucción de ecosistemas genera la deforestación de grandes extensiones de terreno y la contaminación de los ríos, todo para satisfacer la gran demanda energética. Entre las metodologías más dañinas a los ecosistemas estarían la explosión de montañas para extraer carbón, el *fracking* hidráulico, la perforación petrolera costa afuera, y la más devastadora, el proceso de extracción de arena bituminosa.

#### MÉXICO FRENTE A UN CAMBIO ENERGÉTICO

Hoy en día México invierte más de lo que creemos en un cambio de modelo energético; se están lanzando múltiples proyectos enfocados en las áreas de biogás, biodiesel y tratamiento de desechos orgánicos, proyectos como el CEMIE-Bio (<http://proyectofose.mx/2016/02/03/cemie-bio-los-frutos-la>

**biomasa**) apoyado por CONACyT y diferentes clústeres nacionales que tiene líneas de investigación en, 1) biocombustibles de sólidos, 2) bioalcoholes, 3) biodiesel y biogás y 4) bioturbosina. El clúster de biodiesel y biogás está a cargo del Dr. Elías Razo, Profesor Investigador en el IPICyT, quien afirma que nuestro país es líder mundial en el desarrollo de biocombustibles de hidrógeno, algo que nos abre muchas oportunidades en un plazo de tiempo que tal vez no exceda de la segunda década de este siglo, ello a pesar de que nuestro país se mantiene entre los diez mayores productores de petróleo del mundo, de acuerdo con la revista Forbes:

En el caso de México, se mantiene en el 'Top ten' de los países con mayor producción, pero en reservas probadas el país ha ido cayendo irremediablemente. En 1992, las reservas del país eran de 51,000 millones de barriles, en 2002 bajaron a 17,200 millones y en 2012 hasta 11,400 millones, según estimaciones de BP. Francisco Muciño. (Raulin, 2008)

Es claro que México es un país muy acostumbrado a la obtención de energía por medio de este método. Hagamos un ejercicio, pensemos en Titán, una de las lunas de Saturno, contiene lagos y mares de metano y etano, moléculas de gas natural en forma líquida, compuestos que utilizamos para la obtención de energía (Muciño, 2014). Probablemente pasó por tu mente la siguiente idea: si viviéramos en un satélite natural como Titán, o si pudiéramos traer sus hidrocarburos, no sufriríamos un déficit de gases naturales (aunque es probable que nos los terminaríamos con el tiempo). El punto es el hecho de lo acostumbrados que estamos a esta materia prima, pero si utilizáramos otra materia prima como el hidrógeno, el material más abundante del universo, con una energía de combustión favorable, otra cosa sería; el hidrógeno, además se puede transformar a energía eléctrica de forma directa, se encuentra en la composición del agua, de la cual se puede obtener por electrólisis y es residuo metabólico de algunas bacterias. Las máquinas que usamos actualmente no son iguales a las que



© Itziar Aretxaga. Lobo marino californiano (*Zalophus californianus*). Isla Espíritu Santo, Mar de Cortés, Baja California Sur.



© Itziar Aretxaga. Lobo marino californiano (*Zalophus californianus*). Isla Espíritu Santo, Mar de Cortés, Baja California Sur.

había hace 100 años, pero nuestras fuentes de energía siguen siendo las mismas, a pesar de que hoy en día contamos con tecnología para explotar fuentes renovables (solar, cinética de las olas, hidrógeno, eólica). Debemos mejorar estas energías



© Itziar Aretxaga. Lobo marino californiano (*Zalophus californianus*). Isla Espíritu Santo, Mar de Cortés, Baja California Sur.



© Itziar Aretxaga. Lobo marino californiano (*Zalophus californianus*). Isla Espíritu Santo, Mar de Cortés, Baja California Sur.

y dejar atrás las que están causando problemas, tanto ambientales como de reserva.

Resumiendo: México es un país que cuenta con grandes reservas de crudo, pero estas disminuyen, por lo que debemos buscar nuevas fuentes de energía; la investigación de producción biológica está creciendo y muestra resultados prometedores, por ello las investigaciones en este campo parecen ser

una inversión factible, tanto económicamente como para el desarrollo de la investigación nacional.

#### ¿CÓMO SE LLEVA A CABO LA PRODUCCIÓN BIOLÓGICA DE HIDRÓGENO?

Existen tres tipos de microorganismos que participan en la producción de hidrógeno: 1) cianobacterias, 2) bacterias anaerobias y 3) bacterias fermentativas. Las primeras son organismos fotosintéticos que pueden descomponer el agua en hidrógeno y oxígeno de forma directa mientras reciban luz; los segundos utilizan sustancias orgánicas como materia prima para metabolizarse en hidrógeno mediante las enzimas llamadas hidrogenasas (Kirtay, 2011). Además, existen cuatro procesos mediante los cuales los microorganismos llevan a cabo la producción de hidrógeno: 1) biofotólisis directa, 2) biofotólisis, 3) fotofermentación y 4) fermentación oscura. Todos los procesos son controlados por enzimas especializadas llamadas hidrogenasas y nitrogenasas, estas enzimas tienen la habilidad de usar dos electrones para reducir dos protones ( $H^+$ ) a dos átomos de hidrógeno ( $H_2$ ) (Argun y Kargi, 2011)

Las hidrogenasas son la llave de la producción de biohidrógeno y se clasifican en *Uptake hydrogenases* y *reversible hydrogenases*; las primeras cumplen con la función descrita anteriormente, y las segundas se encargan de descomponer el hidrógeno en electrones y protones (Kirtay, 2011).

#### FERMENTACIÓN OSCURA

Esta fermentación se presenta en bacterias anaerobias como microalgas, aunque de este proceso no solo se obtiene hidrógeno, sino también dióxido de carbono ( $CO_2$ ), metano ( $CH_4$ ) y sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ) (Argun & Kargi, 2011). Este tipo de proceso ocurre en bacterias anaeróbicas que crecen en ambientes ausentes de luz con sustratos ricos en carbohidratos (Kirtay, 2011). La fermentación oscura tiene ventajas como su independencia de la luz y de factores ambientales como la lluvia, que son factores no controlables, por lo que se

vuelve un buen partido para su uso en biorreactores o laboratorios, además de que su productividad máxima registrada es de cuatro moles de hidrógeno por mol de glucosa ( $C_6H_{12}O_6$ ), esta productividad está condicionada al desecho final en forma de ácido acético ( $CH_3COOH$ ); cuando el producto final cambia, también lo hará el rendimiento para más o menos moléculas de hidrógeno (la mayoría de las veces menos) (Argun & Kargi, 2011).

La producción teórica máxima de cuatro moles de hidrógeno está condicionada con el producto final en forma de ácido acético, mientras que la más baja está relacionada con el producto final en forma de propionato. Los microorganismos de alta producción son del género *Clostridium*, destacablemente *pasteurianum*, *butyricum* y *beijerinckii*, aunque *Clostridium propionicum* es un bajo productor (Kirtay, 2011).

#### FOTOFERMENTACIÓN

Algunas bacterias como *Rhodospirillaceae* (bacterias púrpuras no sulfurosas) pueden producir hidrógeno mediante la enzima nitrogenasa, usando ácidos orgánicos como el ácido acético, condicionado a la ausencia de compuestos nitrogenados debido a que estos actúan como inhibidores de esta enzima; estas enzimas pueden reducir protones a hidrógeno gaseoso usando energía extra de moléculas de ATP (Kirtay, 2011). Este método tiene como desventajas el uso de nitrogenasas (enzimas de alta demanda energética), de poca eficiencia en la conversión de la energía solar, además de ser dependientes de un factor no controlable como la presencia de la luz solar y las condiciones climáticas como la lluvia o cualquier circunstancia que impida la correcta obtención de la energía solar suficiente para la reacción. Sin embargo, algo que lo hace atractivo es el hecho de que necesita como sustrato ácidos orgánicos como el ácido acético, uno de los productos finales de la fermentación oscura, con lo que se busca optimizar la producción de hidrógeno de hasta 12 moles de hidrógeno, en lo que sería un proceso mixto de dos estaciones con diferentes bacterias en condiciones completamente diferentes.

#### OPTIMIZACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO

Una producción de 4 moles de hidrógeno por mol de glucosa está bien, pero 12 moles no suena nada mal. La combinación de la fotofermentación y la fermentación oscura supone una producción máxima de 12 moles de  $H_2$ . El primer paso sería la reacción de fermentación oscura con glucosa y dos moléculas de glucosa como sustrato, lo cual reaccionaría en dos moléculas de ácido acético, dos moléculas de dióxido de carbono y cuatro moléculas de hidrógeno; después de esto el segundo paso o estación sería la fotofermentación, usando las dos moléculas de ácido acético y cuatro moléculas de agua como sustrato para reaccionar en ocho moléculas de hidrógeno diatómico y cuatro moléculas de dióxido de carbono, dando al final una producción de 12 moles de  $H_2$  (Kirtay, 2011). Hasta ahora, la producción más alta registrada ha sido de 7.1 moles de  $H_2$  (Argun y Kargi, 2011); aunque no son los 12 hidrógenos esperados, es el mayor avance que tenemos y sigue siendo mayor que la producción máxima de la fermentación oscura de cuatro moles de  $H_2$ . Las investigaciones siguen corriendo, así como las expectativas de alcanzar los 12 moles de  $H_2$ .

Otra forma de optimizar la producción de hidrógeno sería mediante ingeniería metabólica o biología sintética; como mencionamos anteriormente, el rendimiento de la producción de hidrógeno depende de los productos finales; si lo que no quisiéramos fuera la síntesis de propionato o ácido láctico, se podría encontrar una forma de no solamente impedir la síntesis de ese producto por medio de su enzima especializada, sino también de cambiar la naturaleza de esta enzima para obtener algo que nos beneficie más, como sería ácido acético.

Piénsalo de esta manera: se puede modificar el origen para sintetizar lo que más nos convenga, al final será una enzima que cumplirá la función de convertir el sustrato en un producto de nuestro interés. Esto funciona bien si se sabe usar, mientras no se modifique una parte importante



© Itziar Aretxaga. Lobo marino californiano (*Zalophus californianus*). Isla Espíritu Santo, Mar de Cortés, Baja California Sur.

del microorganismo que se encargue del perfecto funcionamiento del proceso, a menos que se lo modifique de tal forma que el organismo pueda continuar con sus funciones y las nuevas enzimas diseñadas, claro está.

#### TRATAMIENTO DE RESIDUOS ORGÁNICOS MEDIANTE LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO

La mayoría de las zonas agroindustriales terminan produciendo residuos orgánicos con los que ya no pueden trabajar y los envían a cumplir otras funciones, como de abono o cultivo de lombrices, pero estos residuos pueden servir de sustrato para la síntesis de hidrógeno, dado que los microorganismos pueden metabolizar los azúcares que estos contengan (Oceguera-Contreras, 2018).

#### DIGESTIÓN ANAERÓBICA

Empieza con la hidrólisis y acidogénesis en un ambiente sin oxígeno; un ejemplo sería un ambiente

con temperaturas altas donde se elimina el oxígeno disuelto, después se agregan organismos productores de hidrógeno (Guo y cols., 2010). Para una buena digestión anaeróbica se debe hacer un pretratamiento de los residuos; la hidrólisis es el primer paso, y es la descomposición de azúcares más complejos por medio de enzimas para obtener azúcares más simples; a partir de aquí las bacterias hidrológicas son capaces de metabolizar estos azúcares en ácidos grasos volátiles como el ácido acético u otros compuestos como lactato o alcoholes, estas reacciones serán acompañadas de las reducciones de protones a moléculas de hidrógeno por medio de las hydrogenasas.

#### BENEFICIOS DEL HIDRÓGENO Y SUS APLICACIONES EN LA SOCIEDAD

No es noticia la condición actual de nuestro planeta debido a la quema de combustibles fósiles a lo largo del tiempo, la deforestación excesiva, la contaminación de las aguas y la emisión de compuestos como clorofluorocarbonos, los cuales destruyen la capa de ozono que nos protege de la radiación

solar. La energía por hidrógeno es de tipo cero emisiones debido a que cuando se pasa por una celda de combustible para su transformación en energía eléctrica, obtenemos como residuo agua, por lo que desaparecería la preocupación de las emisiones contaminantes debido a que se eliminan por completo. Entonces, te preguntarás ¿qué es lo que espera el mundo para usar este tipo de energía? La verdad es que nada, el hidrógeno será la energía del futuro, ya se construyen autos impulsados por hidrógeno, aunque la obtención de este sea por electrólisis, un método poco conveniente debido a que utiliza energía eléctrica para funcionar, y esto es algo que puede hacerse empleando celdas solares u otro método. Nikola Motors está lanzando sus modelos al mercado, además de múltiples estaciones de hidrógeno en Estados Unidos (<https://nikolamotor.com/stations>) con un precio gratuito para usuarios de Nikola, y a un costo de 3.50 dólares por recarga para los no usuarios, una idea bastante satisfactoria para los usuarios de Nikola debido a que, una vez comprado el auto, nunca deberán pagar por gas, lo cual demuestra un verdadero compromiso por un cambio energético, así como se ha visto con Tesla Motors. Esto marcaría un nuevo estilo de vida para la sociedad; si países influyentes toman este camino, los demás países les seguirán con la confiabilidad de sus aplicaciones en nuestros estilos de vida energéticamente dependientes, además de las crecientes investigaciones en la optimización, la producción se vuelve cada día más viable. Pronto esta energía podrá ser tan común en el mundo como la energía solar o la eólica.

A manera de conclusión se puede decir que el hidrógeno es el elemento más abundante del universo, tiene una buena energía en combustión y energética (122 kJ/g), tres veces más que cualquier hidrocarburo; se puede transformar en energía eléctrica de forma directa y el único residuo sería agua, además de que los microorganismos cuentan con enzimas especializadas para su producción. Es como si la naturaleza nos estuviera gritando: iahí está la solución! El universo ya nos proporcionó todo, condiciones para el agua líquida y el desarrollo de hidrogenasas en microorganismos adaptados para

la luz u oscuridad; cada día sabemos más de ellos y su metabolismo, lo cual nos puede dar más pistas acerca de cómo tomar un mayor beneficio de esto. Podremos manejar mejor nuestra vida dependiente de energía de una manera más equilibrada con el mundo que nos rodea e iniciar un nuevo estilo de vida, además de ayudar al desarrollo de la investigación científica en México en una esperada próxima década con “energía del futuro”.

#### **AGRADECIMIENTOS**

Este proyecto fue realizado gracias al apoyo a la incorporación de NPTC de PRODEP con expediente número UDG-PTC-1348.

#### **R E F E R E N C I A S**

- Guo XM, Trably E, Latrille E, Carré H & Steyer JP (2010). Hydrogen production from agricultural waste by dark fermentation: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(19), 10660-10673. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.03.008>.
- Kirtay E (2011). Recent advances in production of hydrogen from biomass. *Energy Conversion and Management*, 52(4), 1778–1789. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2011.01.010>.
- Muciño F (2014). Los países más ricos en ‘oro negro’. *Forbes México*. Retrieved August 21, 2018, from <https://www.forbes.com.mx/los-paises-mas-ricos-en-oro-negro/>.
- Oceguera-Contreras E, Aguilar-Juárez O, Oseguera-Galindo D, Matías-Barragán J, Bolaños-Rosales R, Mena-Enríquez M, ... De León-Rodríguez A (2018). Biohydrogen production by vermicompost-associated microorganisms using agro industrial wastes as substrate. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.236>.
- Photo-fermentation: An overview. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(13), 7443-7459. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.03.116>.
- Raulin F (2008, July 31). Planetary science: Organic lakes on Titan. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/454587a>.

**José Carlos Carrillo-Martínez**  
**Ingeniería en Sistemas Biológicos**  
**Centro Universitario de los Valles**  
**Universidad de Guadalajara**  
**Edén Oceguera-Contreras**  
**Laboratorio de Sistemas Biológicos**  
**Centro Universitario de los Valles**  
**Universidad de Guadalajara**  
[eden.oceguera@academicos.udg.mx](mailto:eden.oceguera@academicos.udg.mx)



© Itziar Aretxaga. Lobo marino californiano (*Zalophus californianus*). Isla Espíritu Santo, Mar de Cortés, Baja California Sur.