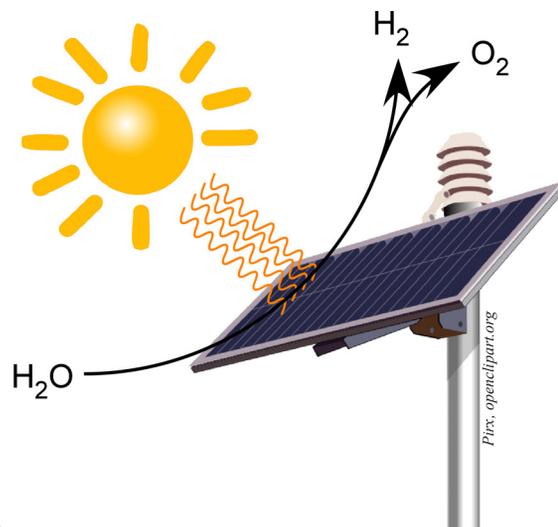


Destacamos de la bibliografía científica...

# Nuevas formas de aprovechar la energía solar y producir hidrógeno



Un grupo de investigadores del Instituto Tecnológico de Israel ha observado que el uso de fotoánodos de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  produce una mejora importante en el rendimiento de las celdas fotoelectroquímicas. Las mejoras están basadas en el uso de láminas muy delgadas de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  que mejoran la eficiencia en el transporte de carga. La elección de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  está basada en su estabilidad en agua, su alta eficiencia de absorción de luz, su ausencia de toxicidad y su bajo coste. Las celdas fotoelectroquímicas son importantes para la electrólisis del agua y la producción de hidrógeno.

Ana Rey de Castro

En un mundo donde la población crece exponencialmente, la demanda energética crece día a día. Se estima que el 87% de la energía mundial es producida a través de la quema de fuentes no renovables (carbón, petróleo y gas natural<sup>1</sup>) cuyo uso ha creado serios problemas de contaminación. Por esta razón, el uso de fuentes renovables (hidroeléctrica, eólica, geotérmica y solar) para la producción de energía está en aumento en muchos países.

En el caso de la fuente solar, su gran ventaja es la enorme cantidad de energía que el sol provee a diario. Tan solo en un año se estima que la Tierra recibe  $3 \times 10^{24}$  J, lo cual supera a la demanda energética global en un factor de 10,000 veces.<sup>2</sup> Sin embargo, esta fuente no puede ser usada extensivamente ya que la tecnología que permite capturarla para transformarla en una energía útil es sumamente cara y poco eficiente.<sup>2</sup>

El Profesor Avner Rothschild y su grupo del Instituto Tecnológico de Israel (Technion) han estado investigando la fotoproducción de hidrógeno utilizando la luz solar como fuente de energía para dicho proceso. Para esto han desarrollado fotoelectrodos de óxido de hierro que absorben la luz solar y canalizan esta energía para electrolizar el agua.<sup>3</sup> La gran ventaja del óxido de hierro es que es un material no tóxico, estable, abundante y muy barato.

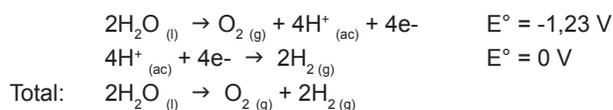
\* Ana Rey de Castro es Bachiller en Química y trabaja como profesora en Rde Tutoring, su propio servicio de clases particulares. Actualmente, se encuentra terminando la licenciatura de Química en la PUCP. (e-mail: anitareydecastro@gmail.com)

La obtención de hidrógeno es sumamente importante pues este es un combustible altamente eficiente y amigable con el medio ambiente ya que su combustión solo produce agua. De esta forma la energía solar no estaría limitada a proporcionarnos electricidad sino que también podría generar combustibles que ayuden a cubrir los demás aspectos de nuestra demanda energética.

## ¿Cómo funcionan estas celdas?

Las celdas fotoelectroquímicas se basan en semiconductores que absorben la energía del sol para luego producir una corriente eléctrica que permite la electrólisis del agua.

Las reacciones que se dan en estas celdas se muestran a continuación e indican que se necesita un voltaje mínimo de 1,23 V para poder proceder con la electrólisis del agua:<sup>4</sup>



1. BP Global: "BP Statistical Review of World Energy" Junio 2012. (📄 último acceso: marzo 2013).
2. Gratzel, M.: *Nature*, **2001**, 414, 338-344. (📄).
3. Dotan, H. et al.: *Nature Materials*, **2012**, 12, 158-164.
4. Jun, K.: "Iron-oxide catalyzed silicon photoanode for water splitting". Tesis doctoral. Massachusetts Institute of Technology (MIT), Septiembre de 2011. (📄).

Sin embargo, para llevar a cabo la reacción neta, se suelen necesitar sobrepotenciales de 0,5 a 0,7 V, debido a diferentes pérdidas del proceso, por lo que la electrólisis del agua empieza a voltajes de 2 V, aproximadamente.<sup>5</sup> Para lograr esto, se deben utilizar semiconductores que tengan una separación de bandas de por lo menos este voltaje y que engloben a los potenciales de oxidación y reducción del agua dentro de su intervalo de la banda de valencia y conducción (ya que van a estar en contacto con ella), según se muestra en la Figura 1.

La separación de bandas no es el único factor importante para la elección del semiconductor, pues también es sumamente importante su capacidad para permitir el movimiento de electrones y huecos hacia la interfase semiconductor-agua, donde podrán ser aprovechados para las reacciones electroquímicas.<sup>6</sup> Es por esto que los semiconductores son utilizados en la forma de películas ultrafinas que disminuyen la distancia que los huecos y electrones tendrán que recorrer pues, de lo contrario, estos pares electrón-hueco podrían destruirse por recombinación, evitando el flujo de corriente eléctrica y la electrólisis.<sup>2</sup>

El TiO<sub>2</sub> ha sido el semiconductor más utilizado para las celdas fotoelectroquímicas porque su separación de banda (3 – 3,2 eV) está en el rango deseado para la electrólisis del agua.

El funcionamiento de una celda de este tipo se muestra en la Figura 2 a y b. La celda consiste en TiO<sub>2</sub> acoplado a un contraelectrodo. Cuando el TiO<sub>2</sub> absorbe un fotón, promueve un electrón a su banda de conducción y crea un hueco en su banda de valencia. Los electrones creados son transferidos al contraelectrodo a través de un circuito externo para que ahí puedan reducir al agua y producir hidrógeno. Al mismo tiempo, el hueco generado en el semiconductor atrae los electrones del agua hasta lograr oxidarla.

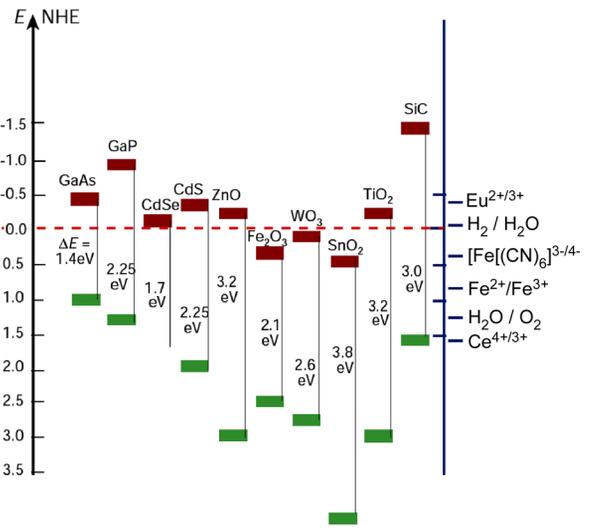


Figura 1.- Posición de las bandas de diversos semiconductores que se encuentran en contacto con agua a pH 1. (Reproducido con permiso de Macmillan Publishers Ltd [Grazel, M.: Nature, 2001, 414, 338-344] © 2001)

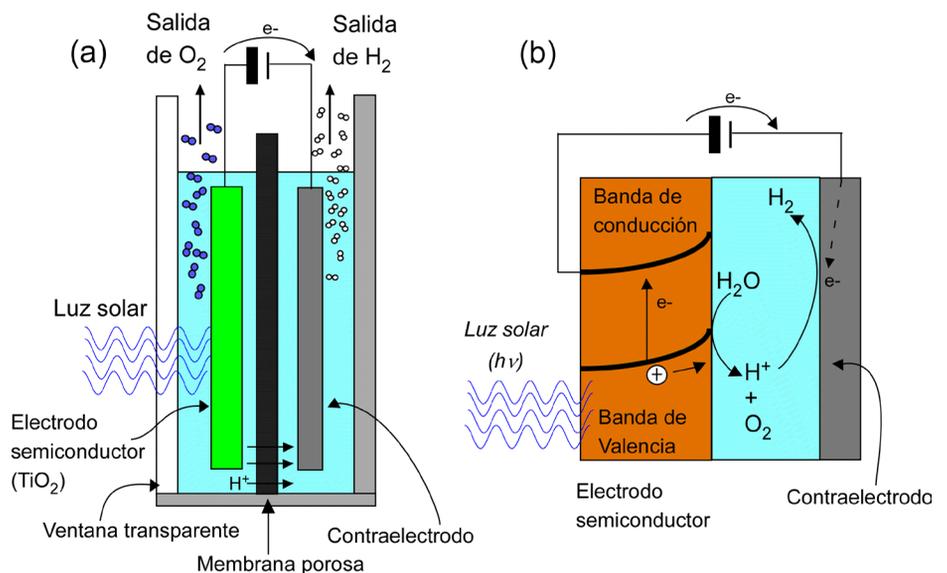


Figura 2. (a) Diseño de una celda fotoelectroquímica basada en un ánodo fotoeléctrico y un contraelectrodo. (b) Principio de operación de la celda fotoelectroquímica (con un semiconductor de tipo n). (Fuente: elaboración propia en base a las referencias 2 y 7).

### Celdas de TiO<sub>2</sub> actuales: costosas y poco eficientes

La diferencia de energía entre las bandas de conducción y valencia en el TiO<sub>2</sub> se encuentra dentro del intervalo energético de la luz ultravioleta. Sin embargo, la luz ultravioleta solo constituye una pequeña fracción de la luz solar (Figura 3), lo cual limita la eficiencia de absorción de luz de las celdas basadas en este material. Es por esto que, actualmente, se buscan

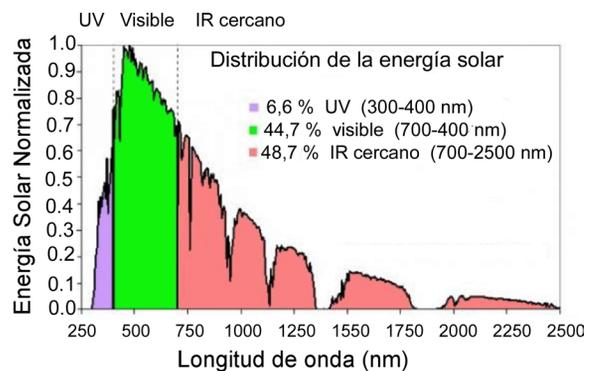


Figura 3. Espectro de luz solar que llega a la Tierra, medido a nivel del mar, dividido en los diferentes tipos de radiación que lo componen. (Fuente: Lawrence Berkeley National Laboratory, EEUU. Traducida y usada con permiso, [1])

5. Brimblecombe, R. y col.: Dalton Transactions, 2009, 9374-9384. [1]  
 6. Frites, M. y Khan, S.U., 215<sup>th</sup> ECS Meeting, Abstract #887, 2009. [1] acceso: marzo 2013)  
 7. Osterloh, F.E. y Parkinson, B.A.: MRS Bulletin, 2011, 36, 17-22. [1]

semiconductores con una menor separación de banda que puedan aprovechar la alta cantidad de luz visible que llega a la Tierra.

Esto crea un nuevo problema, pues el ancho de la separación de bandas determina también la fuerza de enlace en el semiconductor y su resistencia a la fotocorrosión: una alta separación de banda implica enlaces fuertes y estabilidad frente a la fotocorrosión, y viceversa. En consecuencia, los compuestos con una menor separación de banda, que sí absorben en el visible y podrían aprovechar mejor el espectro solar, son poco estables a la fotocorrosión y a los medios ácidos, húmedos y oxidantes en donde deben operar.<sup>2,4</sup>

Una de las formas de superar este inconveniente ha sido el diseño de celdas en tándem basadas en una combinación de dos materiales, uno que funcione como fotoánodo y el otro como fotocátodo.<sup>4</sup>

Entre los fotoánodos posibles se encuentran el  $WO_3$  y  $Fe_2O_3$ , donde las bandas de ambos semiconductores no llegan a cubrir la reducción del agua, pero sí son efectivas ante la oxidación de esta (Figura 1). En los nuevos diseños, estos fotoánodos se acoplan con dispositivos fotovoltaicos adicionales que se encarguen de proporcionar el potencial extra requerido para la completa electrólisis del agua, como se muestra en la Figura 4. En este caso, la absorción de fotones en el ánodo crea pares de hueco – electrón.<sup>2</sup> Los electrones son donados a un segundo fotosistema que se encarga de la reducción del agua y la producción de hidrógeno, mientras que los huecos creados sirven para oxidar al agua.

Avner Rothschild y su grupo de Technion han trabajado con celdas basadas en fotoánodos de  $Fe_2O_3$ . Su ventaja es que es estable a la oxidación y muy barato. El problema de este material es que no es capaz de conducir electrones de una manera muy eficiente: en el  $Fe_2O_3$  una gran cantidad de portadores de carga se extinguen por recombinación antes de ser utilizados en la interfase de la electrólisis.

El gran avance que ha logrado Rothschild y su grupo ha consistido en diseñar películas ultrafinas de  $Fe_2O_3$  ("5000 ve-

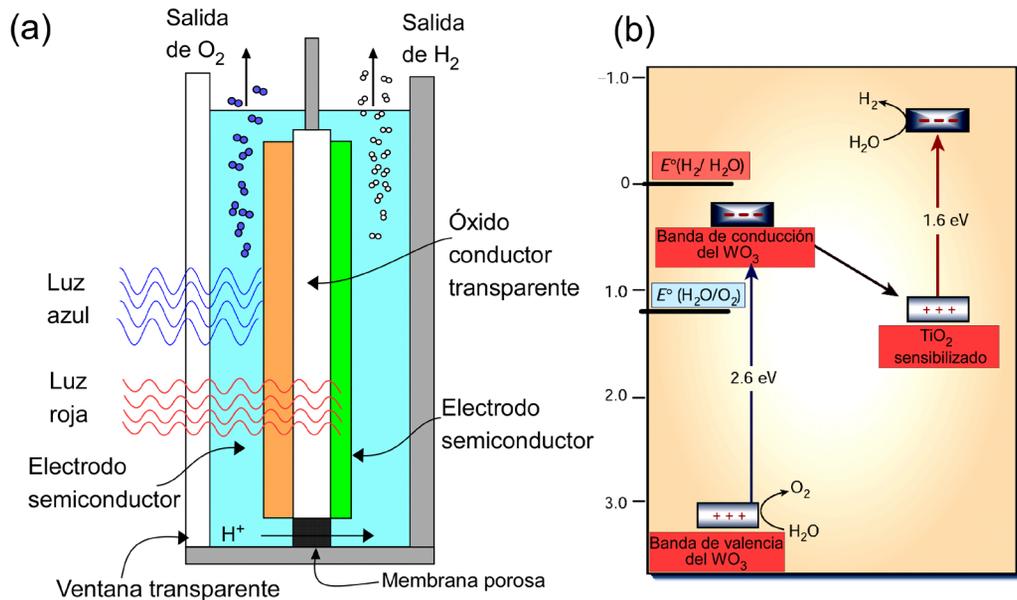


Figura 4. (a) Diseño de una celda fotoelectroquímica en tándem como alternativa a las celdas convencionales mostradas en la figura 2a. (b) Principio de operación de la celda fotoelectroquímica en tándem. (Fuentes: (a) elaboración propia con información de la referencia 7 y (b) adaptada con permiso de Macmillan Publishers Ltd [Gratzel, M.: Nature, 2001, 414, 338-344] © 2001)

ces más delgadas que una hoja de papel”<sup>9</sup>) que disminuyen la distancia que los portadores de carga deben atravesar, lo cual permite que la absorción de luz pueda usarse de manera más eficiente.<sup>9</sup> Asimismo, como la diferencia de energía entre su banda de conducción y de valencia (entre 2 y 2,2 eV) corresponde a la luz visible, puede absorber aproximadamente el 37% de los fotones solares.<sup>6</sup>

El profesor Rothschild menciona que la gran ventaja de este tipo de celda es que “se podrá almacenar la energía solar para que pueda ser utilizada las 24 horas del día”,<sup>8</sup> en comparación con las celdas fotovoltaicas que solo pueden utilizarse cuando la intensidad de luz lo permite.

Asimismo, señala que el uso de ánodos de  $Fe_2O_3$  permitirá reducir la cantidad de metales raros que se suelen extraer y emplear en el diseño de los semiconductores. Según menciona, “la tecnología de atrapamiento de luz podrá ahorrar el 90% de metales raros como el telurio e indio, sin alterar el rendimiento de la celda”.<sup>8</sup>

### Bibliografía esencial

- Dotan, H.; Kfir, O.; Sharlin, H.; Blank, O.; Gross, O.; Dumchin, I.; Ankonina, G. Rothschild, A.: “Resonant light trapping in ultrathin films for water splitting”. *Nature Mater.*, **2012**, *12*, 158-164. (📄)
- Gratzel, M.: “Photoelectrochemical cells” *Nature*, **2001**, *414*, 338-344. (📄)
- Osterloh, F.E. y Parkinson, B.A.: «Recent developments in solar water-splitting photocatalysis» *MRS Bulletin*, **2011**, *36*, 17-22.

8. American Technion Society: “New way to split water molecules into hydrogen and oxygen: Breakthrough for solar energy conversion and storage?” *ScienceDaily*, 12 Nov. 2012. (📄 acceso: Febrero 2013)