

## NANOTECNOLOGÍA INSPIRADA EN LA NATURALEZA: CELDA SOLARES SENSIBILIZADAS CON COLORANTE

por ROCÍO SÁNCHEZ-DE-ARMAS<sup>1</sup> Y EMILIO GUTIÉRREZ-BELTRÁN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>MATERIALS THEORY DIVISION, DEPARTMENT OF PHYSICS AND ASTRONOMY, UPPSALA UNIVERSITY, P.O Box 516, S75120

<sup>2</sup>DEPARTMENT OF PLANT BIOLOGY, UPPSALA BIOCENTER, SWEDISH UNIVERSITY OF AGRICULTURAL SCIENCES AND LINNEAN

CENTER FOR PLANT BIOLOGY, SE-75007, UPPSALA, SUECIA

ROCIO.SANCHEZDEARMAS@PHYSICS.UU.SE

*Enviado: 30 noviembre 2015. Aceptado: 3 diciembre 2015*

Entre los retos más importantes a los que la humanidad debe enfrentarse en la actualidad se encuentran el incremento constante de la demanda de energía y el control de los niveles de CO<sub>2</sub> (generado por la combustión de combustibles fósiles) en la atmósfera. Con el fin de solventar estos problemas e inspirados por el proceso natural de la fotosíntesis los científicos trabajan para transformar de manera eficiente la energía solar en energía eléctrica, desarrollando y optimizando dispositivos llamados celdas solares. Pese a su gran potencial, la tecnología solar presenta en la actualidad una baja eficiencia, manteniendo abierto un amplio campo de investigación centrado en la optimización de dichos dispositivos. En este artículo se realiza una breve descripción del diseño y el funcionamiento de uno de los tipos de celda solar más prometedores, las celdas solares sensibilizadas con colorante (DSSC).

*The conversion of solar energy into electricity is one of the best solutions to solve both the problems of global warming and energy shortage. Inspired by the natural photosynthesis, researchers have developed artificial devices, called solar cells, to perform similar photochemical reactions. Dye Sensitized Solar Cells (DSSC), based on an organic or inorganic dye supported on a semiconductor, are one of the most promising type of solar cell. Although this technology has a strong potential for producing a clean energy matrix, it still remains a great challenge to develop a cheap and stable system with high efficiency. Here, we present a brief description on the design and operation of Dye Sensitized Solar Cells.*

El consumo de energía es uno de los grandes medidores del progreso y bienestar de una sociedad. Un modelo económico como el actual, cuyo funcionamiento depende de un continuo crecimiento, exige una demanda igualmente creciente de energía. Puesto que las fuentes de energía fósil y nuclear son finitas, el desarrollo de nuevos métodos para obtener energía se hace imprescindible para evitar alcanzar una situación en que la demanda no pueda ser abastecida y el sistema colapse. Además, el dióxido de carbono producido en la combustión de combustibles fósiles acarrea consigo problemas medioambientales cada vez más graves, como la contaminación, el aumento de los gases de efecto invernadero y la perforación de la capa de ozono.

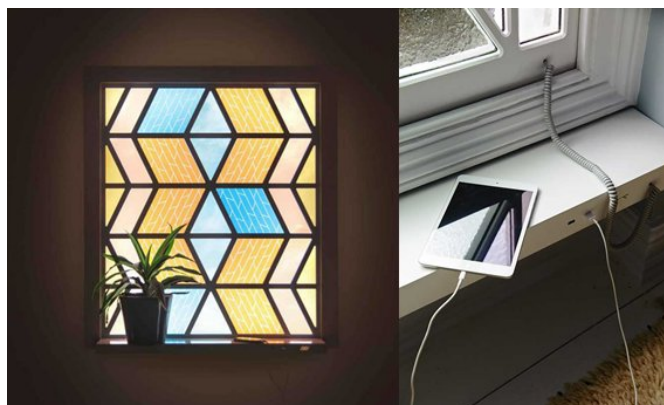
La energía solar constituye una fuente de energía limpia, abundante y renovable. Se estima que la Tierra recibe cada año una cantidad de energía del Sol equivalente a 10<sup>4</sup> veces el consumo mundial de energía. Los dispositivos encargados de convertir la radiación solar en energía eléctrica se denominan *celdas solares fotovoltaicas*. Su funcionamiento está basado en el efecto fotoeléctrico, descrito por Heinrich Hertz en 1887, y posteriormente explicado teórica-

mente por Einstein en 1905, explicación por la que obtuvo el Premio Nobel de Física en 1921.

La primera celda solar fotovoltaica fue construida por Charles Fritts en 1884. Estaba formada por selenio cubierto de una fina capa de oro y poseía una eficiencia del 1%. Sin embargo, no fue hasta 1954 cuando los Laboratorios Bell construyeron la primera celda solar comercial, basada en silicio. Desde entonces la investigación en celdas solares no ha cesado, y se siguen produciendo importantes avances. Actualmente coexisten en los laboratorios de investigación tres generaciones diferenciadas de celdas solares, que aportan distintas soluciones a un mismo problema: usar el sol como fuente de energía.

La mayoría de las celdas solares presentes actualmente en el mercado están basadas en obleas de silicio. Es la llamada *tecnología de primera generación*. Como ésta es ya una tecnología madura, su coste total está dominado por el coste del material y no es posible conseguir avances significativos en la reducción de los costes de producción. Estos dispositivos se están acercando al límite de eficiencia teórica que está entre el 31% y el 41% y tienen un periodo de amortización de 5 a 7 años. Durante la década de

los 80 apareció la tecnología fotovoltaica de *segunda generación* cuya principal característica consiste en la sustitución de las obleas de silicio, de amplia superficie, por capas delgadas de semiconductor (como telurio de cadmio -CdTe-, silicio amorfo -a-Si- o seleniuro de cobre-indio -CIS-). Para la construcción de la celda se aplica una capa fina de estos materiales sobre un sustrato como vidrio o cerámica, lo que hace que se produzca una reducción significativa de material y por lo tanto del coste del dispositivo. Estas celdas tienen las mismas limitaciones de eficiencia teórica que las de la primera generación, pero a un menor coste. Sin embargo, hasta el momento no se ha conseguido alcanzar con este tipo de celdas la eficiencia que se consigue con celdas convencionales de silicio. Se denominan celdas solares de *tercera generación* aquellas que permiten obtener eficiencias de conversión eléctrica teóricas mucho mayores que las actuales y a un coste de producción mucho menor. Se trata de una tecnología en fase de experimentación por lo que se están aplicando diferentes estrategias con el fin de conseguir aumentos sustanciales en la eficiencia.

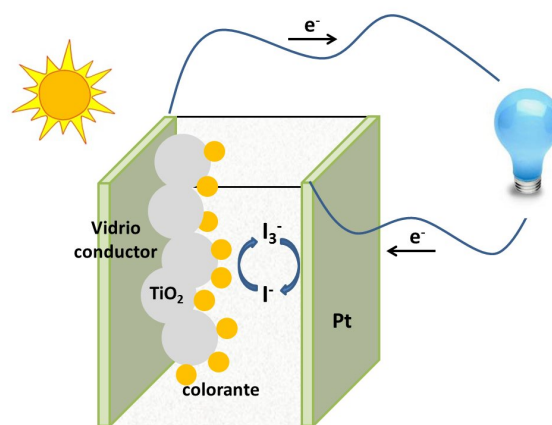


**Figura 1.** Ventanas con celdas DSSC diseñadas y construidas por Marjan van Aubel.

Entre las celdas solares de tercera generación, una de las alternativas más prometedoras desde un punto de vista tecnológico consiste en utilizar celdas solares sensibilizadas mediante un colorante o DSSC (*Dye Sensitized Solar Cells*). La alternativa DSSC propuesta en 1991 por Grätzel<sup>[1]</sup> implica la adsorción de un colorante sobre la superficie del semiconductor (óxido de titanio, TiO<sub>2</sub>) que actúa como captador de la energía solar. La excitación inducida por el fotón tiene lugar en el colorante que transfiere un electrón al semiconductor iniciando el ciclo de corriente. El óxido de titanio sólo puede excitarse con radiación ultravioleta. El colorante extiende el rango de absorción hacia longitudes de onda mayores, hacia la zona del visible. De este modo las funciones de absorción y

transporte de carga necesarias para el funcionamiento de una celda solar quedan separadas en las DSSC. La principal ventaja que ofrece este tipo de celdas es que sus costes de fabricación son mucho menores que los de las celdas convencionales basadas en silicio. Además pueden imprimirse fácilmente sobre superficies flexibles y pueden construirse paneles portátiles, multiformas, semitransparentes, coloreados y decorativos. Aunque ésta es una tecnología relativamente nueva ya existen relojes comerciales que se abastecen de energía solar por medio de una celda de Grätzel. Sin embargo, por sus características de flexibilidad y variedad de colores y formas, el futuro de estas celdas se encuentra en nuevas aplicaciones que pasan por la decoración o por su integración en elementos arquitectónicos. Algunos diseñadores como Marjan van Aubel están haciendo uso de esta tecnología para construir, por ejemplo, ventanas de colores que, mientras dejan pasar la luz, la aprovechan para generar electricidad (Figura 1).

Actualmente existen numerosos grupos de investigación implicados en la mejora de la eficiencia y también de la estabilidad de este tipo de dispositivos. Una DSSC típica contiene un electrodo de un óxido semiconductor poroso, generalmente TiO<sub>2</sub> nanocrystalino, soportado sobre un vidrio conductor (TCO) y recubierto con una monocapa de colorante (fotoelectrodo). Además, es necesario un contraelectrodo, que actúa como cátodo y generalmente es de platino (Pt), y un electrolito regenerador que contiene el par redox I<sup>-</sup>/I<sub>3</sub><sup>-</sup> en un disolvente orgánico (Figura 2).



**Figura 2.** Esquema general de una celda solar sensibilizada con colorante.

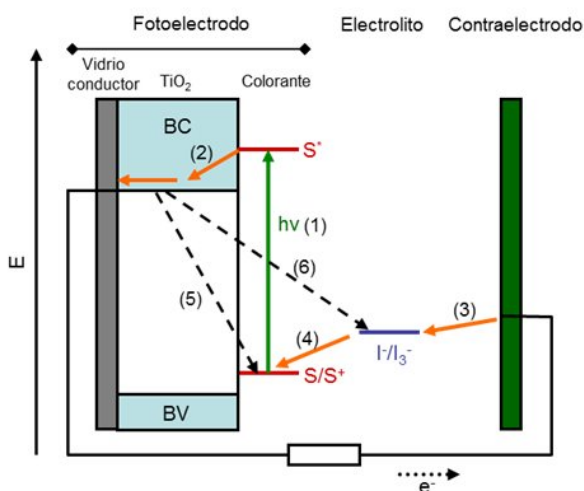
El modelo que se usa para describir el principio fotoquímico de las celdas solares sensibilizadas con colorante es similar al que se emplea para describir el proceso natural de la fotosíntesis. El pigmento más importante en este proceso es la clorofila, que

tiene la capacidad de absorber en la región azul del espectro electromagnético. En la captación de luz del sol y su transformación en energía química está involucrada una compleja maquinaria proteínica situada en los cloroplastos: el Fotosistema I absorbe un fotón proveniente de la radiación solar y provoca la concomitante oxidación del sistema; este electrón cedido por el Fotosistema I es transferido al Fotosistema II, un complejo de proteína-clorofila, que actúa como aceptor. El siguiente proceso inmediato es la transferencia del electrón a una molécula de quinona asociada al complejo del fotosistema, desencadenando así una bomba de protones que lleva a la reducción de  $\text{NADP}^+$  a  $\text{NADPH}$ . Lo que sigue en la cascada de reacciones tiene como consecuencia la síntesis de moléculas de elevada importancia para el organismo.

electrones inyectados en la banda de conducción del  $\text{TiO}_2$  pueden recombinarse con el colorante oxidado o con los iones  $\text{I}_3^-$  en la superficie del semiconductor. Para obtener buenas eficiencias es necesario que los procesos de inyección y regeneración estén favorecidos (sean más rápidos) con respecto a los procesos de recombinación.

La eficiencia de la celda vendrá marcada por las propiedades del semiconductor, del colorante y del electrolito regenerador. Como dijimos anteriormente el óxido de titanio es el semiconductor más utilizado en DSSC. Se han probado otras alternativas, como  $\text{ZnO}$ ,  $\text{SnO}_2$ , o  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ , pero no se ha conseguido con ellos un aumento significativo de la eficiencia<sup>[2]</sup>. Con respecto al colorante, las eficiencias más altas se han conseguido hasta el momento en celdas sensibilizadas con complejos de rutenio<sup>[3]</sup>. Sin embargo, en los últimos años existe una marcada tendencia a la utilización de colorantes puramente orgánicos como sensibilizadores en DSSC. Se han sintetizado y estudiado diferentes colorantes y se han conseguido celdas solares con rendimientos por encima del 12% con colorantes basados en la porfirina (presente en la clorofila)<sup>[4]</sup>. Los colorantes puramente orgánicos presentan ventajas importantes sobre los complejos de rutenio. En primer lugar pueden sintetizarse y modificarse fácilmente y con un coste mucho menor que los complejos de rutenio. Es posible introducir distintos grupos funcionales en el esqueleto de los cromóforos que permiten modificar sus propiedades y ajustarlas para optimizar la eficiencia de las DSSCs. Además, estos colorantes son capaces de absorber más radiación en la zona visible del espectro, lo que facilita el proceso de captación de la luz solar. Por último, al no poseer metales raros como el rutenio o el platino, no existe la preocupación del posible agotamiento de las materias primas. Recientemente se ha intentado sensibilizar celdas solares con extractos naturales extraídos directamente de la flor de Jamaica (*Hibiscus sabdariffa*) y de la piel de la granada (*Punica granatum*), pero las eficiencias obtenidas en estas celdas resultaron bastante bajas (alrededor del 1.8%)<sup>[5]</sup>. En cuanto al electrolito regenerador existen en la actualidad varias vías de investigación abiertas, que incluyen la introducción de sales iónicas o electrolitos sólidos<sup>[6]</sup>.

Resumiendo, las celdas solares sensibilizadas con colorante constituyen una alternativa muy prometedora para la utilización de la energía solar, aunque es necesario continuar con el extenso trabajo de investigación realizado en los últimos años en este campo con el fin de optimizar los distintos procesos que tienen lugar durante su funcionamiento y conseguir así celdas más eficientes y duraderas.



**Figura 3.** Esquema del funcionamiento de una DSSC. Los procesos que tiene lugar son: excitación (1), inyección (2), reducción del electrolito (3), regeneración del colorante (4). Durante el ciclo pueden producirse pérdidas de eficiencia por recombinación (5 y 6).

De manera análoga una celda solar sensibilizada con colorante transforma energía solar en energía eléctrica, a través del mecanismo esquematizado en la Figura 3. Al incidir la radiación sobre el fotoelectrodo es absorbida por el colorante (el  $\text{TiO}_2$  es transparente a la luz visible) que pasa a su estado excitado ( $\text{S}^*$ ), desde el cual se produce la inyección de los electrones hasta el semiconductor ( $\text{TiO}_2$ ), seguida de la difusión de los electrones hasta el vidrio conductor. El circuito se cierra externamente en el contraelectrodo donde los electrones reducen el  $\text{I}_3^-$  a  $\text{I}^-$ , especie que repondrá electrones al nivel desocupado en el colorante, cerrando el ciclo de corriente. Durante este ciclo se producen procesos no deseados que suponen una pérdida de la eficiencia de la celda solar. Los



## Referencias

<sup>1</sup>O'Regan B, Grätzel M. *Nature* 353: 737-740, 1991.

<sup>2</sup>Rho W, Jeon H, Kim H, and others *J. Nanomaterials* Article ID 247689. 2015.

<sup>3</sup>Robertson N. *Angew. Chem. Int. Ed.* 45: 2338-2345, 2006.

<sup>4</sup>Yella A, Lee H, Nok HN, and others. *Science* 334: 629-634, 2011.

<sup>5</sup>Hernández AR, Estevez M, Vargas S, and others. *J. appl. res. technol.* 10: 38-47, 2012.

<sup>6</sup>Guillén E, Fernández-Lorenzo C, Alcántara R, and others. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 93: 1846-1852, 2009.

## Encuentros con las novedades

### ¿Un nuevo origen de los humanos?



Créditos de la fotografía

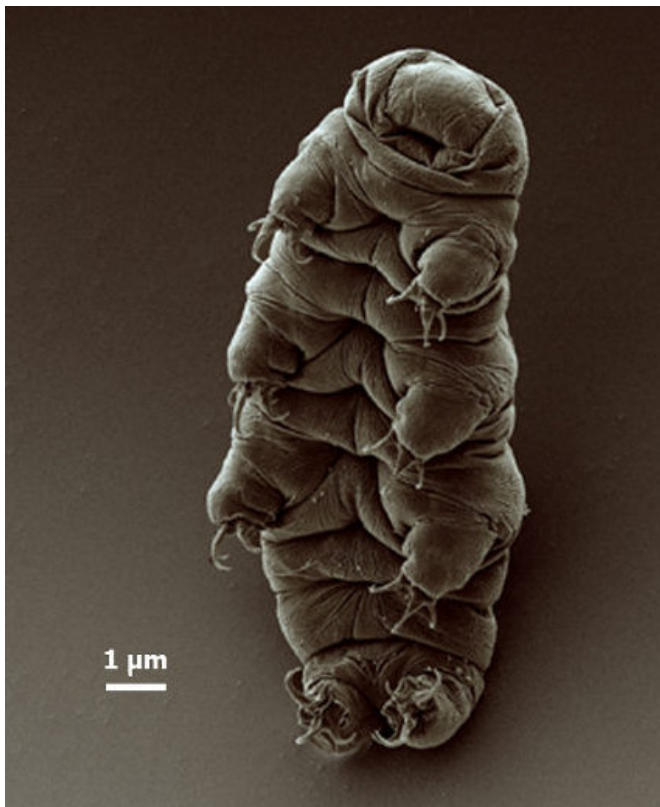
(Berger et al. *eLife* 2015;4:e09560). A pesar de que paleoantropólogos se caracterizan por discrepar entre ellos hasta extremos ridículos, no creo que mantengan ninguna discusión sobre que el descubrimiento del año (y quizás del siglo) sea el hallazgo en una cueva de Sudáfrica de *Homo nadelii* (Hombre estrella, en legua sesotho). Este descubrimiento es excepcional por muchos motivos. Se trata de una especie de homínido extinto representado por unos 1550 restos correspondientes, al menos, a 15 individuos, los cuales presentaban una estatura y peso análogos a los de un humano pequeño actual (unos 150 cm y 45 kg, respectivamente). La morfología de los pies indican una excelente adaptación a la bipedestación y la de sus manos a la manipulación de objetos. Sin embargo la longitud y curvatura de sus dedos revelan que todavía retienen cierta capacidad de agarre para trepar y colgarse durante desplazamientos arbóreos. Llama poderosamente la atención que, aunque la morfología craneal y dentición sea similar a la de los

primeros representantes del género *Homo*, su volumen endocraneal es muy reducido, entrando en el rango de los australopitecinos (así como su tronco y cinturas escapular y pélvica). Otro aspecto sumamente interesante es que las evidencias disponibles indican que los cuerpos fueron llevados intencionadamente a la cámara dentro de cueva, la cual estuvo siempre a oscuras e inaccesible a otros organismos que no fueran los homínidos. Este gran hallazgo sólo tiene un punto débil: la carencia de una datación. Quizás por ello no ha sido publicado en las revistas *Nature* o *Science* que son donde tradicionalmente se publican este tipo de eventos. La revista elegida para la ocasión ha sido *eLife* que con un tercer puesto en el *ranking* del JCR en el área de Biología, sin duda verá incrementado su índice de impacto con la publicación de este gran descubrimiento. Si se confirmara que es coetáneo de *Australopithecus africanus*, significaría que nuestro género no arrancaríamos en este taxón si no probablemente antes: ¡todo un cambio de paradigma! Puede que para no quedarse atrás, el grupo *Nature* ha decidido publicar en su revista *Nature Communications* la descripción de la mano y el pie de este taxón. Esperemos datación de los restos llegue pronto, mientras tanto estemos seguros que *Homo nadelii* no va dejar de sorprendernos.

### Sorprendente hallazgo en el genoma de los tardígrados

(Boothby et al. 2015. *PNAS Early Edition*, doi:10.1073/pnas.1510461112). La transferencia lateral de genes (TLG) entre taxones diferentes es ya un proceso conocido, pero no así el grado en que su aportación es importante en los metazoos. Boothby y sus colaboradores dan un paso en este sentido con la secuenciación del genoma completo del tardígrado *Hypsibius dujardini*.

Los tardígrados u «osos de agua» son populares por su capacidad para sobrevivir en ambientes extremos: deshidratación total, temperaturas cercanas al cero absoluto, altísima radiactividad, exposición al espacio exterior. Precisamente estas habilidades podrían explicar que un 17,5% del genoma de *Hypsibius dujardini* tenga orígenes taxonómicos tan diversos como bacterias (principal fuente de TLG), arqueas, hongos y plantas. El record en metazoos hasta el momento lo ostentaba un rotífero, *Adineta ricciae*, con un 9,6% de genes de procedencia extraña. Curiosamente, los rotíferos muestran también tolerancia a la desecación, entre cuyas consecuencias está la producción de daños en el ADN. Boothby y colaboradores proponen que, durante la rehidratación de las células, las membranas se tornan permeables a macromoléculas como el ADN, que podría incorporarse al genoma a través de los mecanismos de reparación. Si bien esto es especulación, no lo es, en cambio, que una parte de los genes «importados» codifican mecanismos de reparación del ADN y de protección de membranas y proteínas, precisamente aquellos que hacen posible la enorme capacidad de resistencia de los tardígrados.



Créditos de la fotografía

### ¿Por qué no hay más leones en la sabana?



Créditos de la fotografía

(Hatton et al. 2015. *Science* 349: 1070). En septiembre de este año Hatton y colaboradores han asombrado a la comunidad científica con un trabajo muy interesante que ha visto la luz en la revista *Science*. En él, tras una completa búsqueda bibliográfica, se pone de manifiesto una sorprendente regularidad que emerge cuando se estudian a gran escala ecosistemas tanto terrestres como acuáticos: la biomasa de predadores y presas se escalan a una potencia próxima a  $3/4$ . Esta relación se cumple tanto para grandes mamíferos, como para invertebrados, plantas o el plancton. Pero ¿qué implicaciones se derivan de este hallazgo? A todos nos resultan familiares las pirámides eltonianas en las que los productores primarios se sitúan en la base mientras que los distintos niveles de consumidores se van colocando cada vez más arriba. Estos autores han puesto de manifiesto que la bases de dichas pirámides tróficas se hacen desproporcionadamente mayores cuanto más biomasa contienen, o lo que es igual, a mayor biomasa menor productividad. Este exponente es curiosamente similar al obtenido a nivel individual entre producción y biomasa, y que se encuentra también en otros fenómenos biológicos tales como es la ley de Kleiber (la tasa metabólica respecto al tamaño corporal). Los autores reconocen que no pueden explicar el por qué de esta regularidad, pero sus datos son concluyentes al respecto. Está claro que, a veces, la recopilación y estudio de los datos publicados por otros autores ¡pueden ensamblarse en metaanálisis muy fructíferos científicamente!