



EL LARGO CAMINO DE LA CAPTURA SOLAR

¿CÓMO UTILIZAR DIRECTAMENTE LA ENERGÍA DE LOS FOTONES DEL SOL?

Joan Ramon Morante

La energía solar interceptada por la Tierra es enorme y puede ser transformada en energía térmica, química o eléctrica con diversos mecanismos. Con vistas a conseguir la capacidad de transformar la energía suficiente para conseguir una sociedad sostenible, este artículo analiza las diferentes tecnologías solares existentes, sus costes y sus expectativas.

En los campos de la salud y de la energía se asientan los dos pilares principales de la investigación de la sociedad actual. Este papel destacado de la energía se debe a la necesidad de disponer de una energía abundante y barata, libre de restricciones geopolíticas. La energía es imprescindible para el desarrollo sostenible de la sociedad y, por tanto, esencial para un futuro que aspire a satisfacer los requerimientos de agua, trabajo, alimentos, vivienda, confort, etc.

Para valorar el papel de la energía es significativo considerar que nuestro país, de media, necesita diariamente, por habitante, el equivalente energético a unos 13,5 litros de petróleo. Probablemente esta cantidad no dice nada en sí misma. Pero si admitimos que todo el mundo tiene derecho a mantener un mismo nivel de vida, la generalización de esta demanda equivaldría a triplicar el consumo actual en todo el planeta, en especial si consideramos el incremento previsible de población en los próximos años. Actualmente, hay un consumo de 37,5 litros equivalentes de petróleo por habitante y año en EE UU, frente a menos de un litro en algunos países africanos.

Mucho se ha escrito sobre la capacidad de las reservas reales y factibles de los combustibles fósiles (petróleo, carbón, gas) y sobre si la humanidad había ya sobrepasado el llamado *peak oil* (demanda por encima de la capacidad de extracción y procesamiento). En realidad, este no es el problema. La previsible demanda de energía mundial requiere prácticamente cuadruplicar

la capacidad de producción de energía. Eso significa prácticamente cuadruplicar la potencia instalada hasta sobrepasar los 50 teravatios. Estas cantidades están muy lejos de todas las capacidades energéticas que nos pueden ofrecer los combustibles fósiles, a parte del inherente problema asociado a las emisiones de CO₂ o de CH₄ a la atmósfera con el correspondiente fuerte impacto sobre el clima. Poniendo en servicio una central de energía de

100 megavatios cada día durante cuarenta años no conseguiríamos acercarnos al objetivo buscado y no habría garantizados fósiles ni tampoco fuentes nucleares de fisión para todas estas centrales.

«LOS AVANCES
EN MATERIALES
NANOESTRUCTURADOS Y EN
CATÁLISIS HAN PERMITIDO
PONER EN MARCHA
IMPORTANTES ACCIONES
EN INVESTIGACIÓN
PARA TRANSFORMAR
LA ENERGÍA SOLAR EN
ENERGÍA QUÍMICA, YA SEA
HIDRÓGENO O METANO»

■ LA ENERGÍA SOLAR, EN CIFRAS

Llegados a este punto, la única fuente disponible garantizada es el Sol. La energía solar interceptada por la Tierra viene a ser de 1 kilovatio por metro cuadrado $-5,4 \times 10^{24}$ julios (J) o 174×10^{15} vatios (W) en total y durante un año—. Es bastante superior a tres órdenes de magnitud la consumida actualmente por los humanos. Teniendo en cuenta una superficie terrestre de 500 millones de km², de los cuales el 71% es agua, con una energía media de unos 1.000 W/m², nos da una fuente más que suficiente, independiente, inagotable y válida por todo el mundo.

De esta energía solar interceptada anualmente por la Tierra, el 70% $-3.850.000$ exajulios, equivalente a 122 billones de kilovatios-hora (kWh)— es absorbido por la atmósfera, los mares y los continentes. Esta energía nos

LA FUERZA DEL MUNDO



MONOGRÁFICO

A la izquierda, Sebastián Nicolau. *Horno del cielo*, 2012. Intervención digital sobre *Workin' 6* (*Escaleras curvadas*). Aluminio, 35,5x73x18,5 cm (fragmento).



llega con fotones de diferente energía que presentan una distribución desde los ultravioletas a los infrarrojos. Una es absorbida y produce gradientes térmicos responsables de los fenómenos meteorológicos, entre ellos el viento. Se estima que tan solo un 0,07% de la energía solar absorbida por el planeta acaba en potencial energía eólica utilizable por los humanos. Sin embargo, aún así, con una eficiencia de captura y transformación de un 20% sería más que suficiente para satisfacer las necesidades eléctricas mundiales.

Otra parte de la energía solar (un 0,1% aproximadamente) es absorbida por los mecanismos de fotosíntesis que fijan el CO₂ para producir materia orgánica. Hay que decir que las eficiencias de conversión fotosintetizadora son muy bajas. Así, la representativa planta del aceite de palma, que tiene una productividad de 4.000 kilos por hectárea y año, presenta un índice ECE (eficiencia de conversión energética) de solo el 0,18%, mientras que las microalgas, con una productividad de 91.000 kilos por hectárea y año, tienen un ECE del 4,5% (proporcionan 956.000 kWh por hectárea y año). En definitiva, queda muy lejos de los sistemas de conversión fotovoltaica, con un ECE medio del 14,5% (células de silicio) y con producciones energéticas por hectárea y año de 3 millones de kWh. Con estos valores, bastarían 450.000 km² para producir toda la energía primaria consumida actualmente por la humanidad. Esta superficie es tan solo una veintena parte de la extensión del desierto del Sáhara.

La energía no aprovechada es radiada de nuevo hacia el espacio por la atmósfera o por el mismo suelo, en valores que representan un 68% de la recibida, unos 3,7 millones de exajulios. Eso representa muchísimo más, miles de veces, que la energía primaria que se necesita hoy en día, y confirma que la energía existe y que únicamente falta captarla y transformarla para usarla de forma sostenible.

Llegados a este punto surgen muchas cuestiones de las que subrayamos tres como fundamentales para explicar y entender la situación de la energía solar y del largo camino que le falta para erigirse como una de las energías renovables realmente alternativa. En primer lugar, cuestiones relativas a las tecnologías solares: ¿cómo se puede captar y aprovechar directamente la energía acogida del Sol por medio de sus fotones? En segundo lugar, los costes: ¿cuáles son los costes asociados? ¿Qué inversiones se necesitan? ¿Cuánto cuesta el kWh eléctri-

co producido? ¿Es competitivo? Y, por último, la viabilidad: ¿hay suficientes materias primas para fabricar e instalar las plantas solares requeridas?

■ LAS TECNOLOGÍAS SOLARES

La absorción de fotones solares y la conversión de su energía puede seguir diferentes mecanismos que dan lugar a la conversión de la energía solar en energía térmica (ECE de radiación solar a electricidad¹ del 16%), en energía química directa² (aún en fase de desarrollo con eficiencias muy prometedoras por los mecanismos de fotocatalisis) y, la más conocida, en energía eléctrica por efecto fotovoltaico.³ Aunque este mecanismo era ya conocido, se empieza a utilizar en 1954 en el Bell Labs, a partir del desarrollo de la tecnología de semiconductores basados en el silicio. En 1958 en el satélite *Vanguard 1*

ya se utilizaron celdas solares fotovoltaicas basadas en silicio, con eficiencia de cerca de un 6% tan solo. Desde entonces, con un importante punto de inflexión en los años setenta a causa de la primera crisis de los combustibles fósiles, la evolución ha sido constante y progresiva en los campos de la investigación y el desarrollo, aunque la implantación comercial está aún lejos de alcanzar entidad económica.

Utilizando solo un material semiconductor, la máxima eficiencia teórica posible es de tan solo el 31% a escala de celda, ya que muchos fotones del espectro solar no acaban siendo útiles para producir electricidad porque no se adaptan

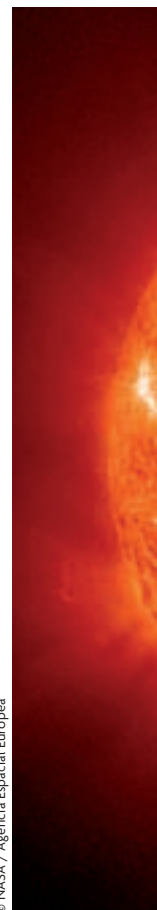
a la banda prohibida del semiconductor. Hay que combinar varios semiconductores para definir una configuración tándem de varias uniones ($n=2, 3, 4...$) para incrementar la eficiencia al 42,5% y llegar a un máximo del 68%. Estos incrementos se pueden ver favorecidos aplicando concentraciones solares, respectivamente, al 41% para un solo material hasta un límite teórico máximo del 86,8%. Alternativamente, hay también mecanismos diferentes al fotovoltaico simple que buscan efectos

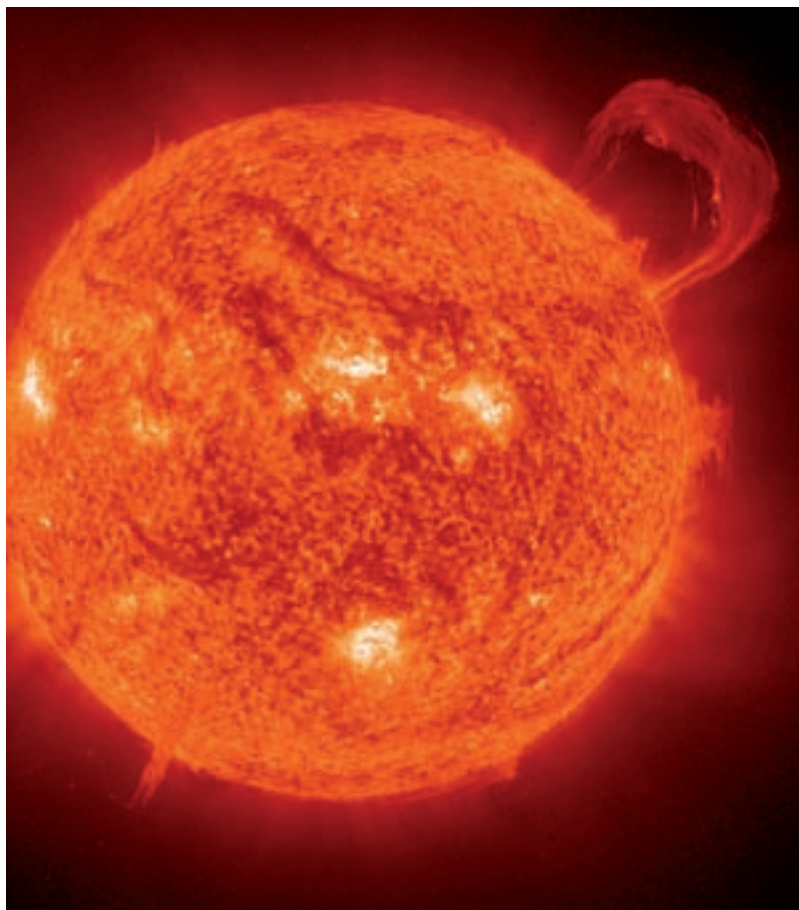
**«SI BIEN HOY EN DÍA
NO ES ASUMIBLE
FINANCIERAMENTE Y HAY
QUE HACER UN GRAN
ESFUERZO PARA QUE SEA
COMPETITIVA, LA ENERGÍA
SOLAR TIENE SU CAMINO
MARCADO: SE PREVÉ
OBTENER VALORES DE 0,04
EUROS/KWH EN LOS PAÍSES
DEL MEDITERRÁNEO SUR EL
AÑO 2030»**

¹ Más información sobre esta tecnología en la Asociación Española de la Industria Termoeléctrica: <<http://www.protermosolar.com>>.

² El Joint Center for Artificial Photosynthesis <<http://solarfuelshub.org>>, del Departamento de Energía de los EEUU, pretende ser uno de los centros punteros en la investigación sobre la elaboración de combustible a partir de la energía solar.

³ Más información sobre la energía fotovoltaica en la web de la Plataforma Europea de Tecnología Fotovoltaica: <<http://www.eupvplatform.org>>.





El Sol es un gran reactor nuclear de fusión que exporta energía al espacio, como cualquier otra estrella. La biosfera terrestre funciona con la ínfima parte de esta energía que intercepta el planeta. Los humanos recuperamos una parte a partir de las plantas y las cadenas tróficas que se derivan de ella, con expresa inclusión de los combustibles fósiles, que son materia orgánica ahorrada en épocas geológicas pretéritas. Últimamente hemos aprendido a capturarla directamente mediante captadores fotovoltaicos, eólicos, etc. Y también hemos aprendido a obtener energía de los procesos radiactivos. Una compleja historia de astucias cargada de claroscuros.



© Anna Mateu

complementarios como la *up conversion*, bandas de impurezas o nuevos mecanismos como los efectos termoiónicos, que presentan también altas eficiencias directas, de un 54%.⁴

Hasta ahora, la denominada primera generación solar, en módulo, tiene un nivel de eficiencia de más del 20%, mientras que la denominada segunda generación, que incluye básicamente la fina capa basada en tecnologías de silicio amorfo, telururo de cadmio (CdTe) y CIS (cobre-indio-selenio), tiene el récord de eficiencia en módulos en cerca del 15%, si bien el récord en celda CIS se sitúa ligeramente por debajo del 20%. Valores bastante interesantes y competitivos comparados con otras tecnologías que, además, en capa fina permiten alcanzar módulos con menos de 4 kg/m², un peso que facilita integrarlos en los edificios.

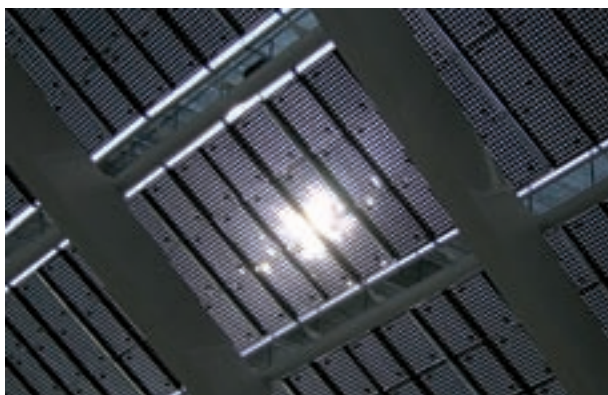
Por su parte, los sistemas de concentración solar anuncian un prometedor 30% de eficiencia y, en todos los casos, la vida media está garantizada por encima de los veinte años, aunque el objetivo es alargarla a más de treinta y cinco. Sin embargo, a pesar de estas propiedades tan excelentes, estos valores no satisfacen aún todas las demandas, si bien cumplen con las necesidades eléctricas de una vivienda para tres personas. Estas se estiman en una media de unos 10 kWh diarios, lo que nos llevaría a un consumo de unos 3.600 kWh anuales, que, con una instalación de unos 15 m² con eficiencias 12-15% se podría cubrir, pero a un coste elevado.

Para superar este escollo, se hacen grandes esfuerzos destinados a desarrollar tecnologías alternativas de muy bajo coste, como son las celdas solares orgánicas o las celdas Graetzel,⁵ pero que tienen bajas eficiencias para

⁴ Sobre este punto, véase el artículo publicado en *Laser Focus World*, el 16 de junio de 2010: «Could solar cells reach 65% efficiency with nanowires?». Disponible en:

<<http://www.laserfocusworld.com/articles/2010/06/could-solar-cells.html>>.

⁵ Véase más información en <<http://isic.epfl.ch/>>.



© Ramon Felch

La fotosíntesis es la puerta de entrada de la energía solar en el sistema biosférico. Su rendimiento es muy discreto. La generación fotovoltaica es la réplica tecnológica directa de la energía de los rayos luminosos.

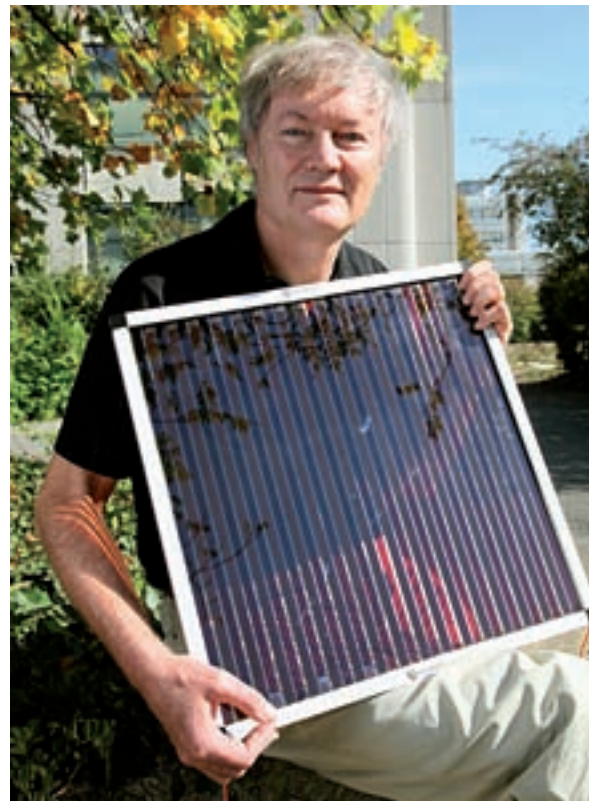
aplicaciones intensivas (< 10 %) y, por otro lado, se buscan sistemas de alta eficiencia como estrategia frente a los costes.

En este ámbito, combinando multiuniones con concentración se han establecido récords prometedores que superan el 40% en celdas, y han sido introducidos los materiales nanoestructurados (nanohilos, pozos cuánticos...), con características muy prometedoras. Los avances en estos materiales y en catálisis han permitido también en los últimos años poner en marcha importantes acciones en investigación de la transformación directa de la energía solar en energía química, ya sea en la producción de hidrógeno (eficiencias prometedoras en el rango por debajo del 10%) o en la producción de metano a partir de sol, agua y CO₂ como fotosíntesis artificial.

■ LOS COSTES Y LAS EXPECTATIVAS

A pesar de las evidentes soluciones y ventajas científicas y tecnológicas de los sistemas de energía solar, nuestra sociedad en general, así como la estructura económica del sector liderada por las grandes industrias energéticas mundiales, se vertebra en un sistema de libre mercado donde el precio de la energía se hace fundamental para que se pueda implantar. Las grandes inversiones en nuevas prospecciones para obtener más recursos, para transportarlos (oleoductos o gasoductos), para procesarlos (refinerías) y distribuirlos o para construir nuevas plantas de producción de electricidad (térmicas, cogeneración, nucleares...) exige mucho capital invertido y cautivo que precisa de una rentabilización adecuada. En consecuencia, el llamado internacionalmente LCOE (Levelized Cost of the Energy), o coste de la energía eléctrica puesta en la red eléctrica independiente de las fuentes de generación, es una pieza clave de este libre mercado. Está claro que se habla de costes financieros y no de valores intangibles como el hecho de tratarse de una energía renovable, respetuosa con el medio ambiente, o de valores sociales añadidos, como las repercusiones por emisiones de CO₂ o por el tratamiento de los residuos radiactivos.

Un estudio detallado de los costes del kWh (EPIA, 2011) nos da hoy en día diferencias significativas: 0,04 €/kWh para los sistemas de cogeneración, 0,074 €/kWh para la energía eólica y 0,19 €/kWh para la energía fotovoltaica en grandes plantas solares. Estos datos muestran, en cierta medida, por qué no es hoy en día asumible financieramente la energía fotovoltaica y por qué hay que hacer aún un gran esfuerzo para que sea competitiva la energía solar. Sin embargo, el camino está marcado. Según la Asociación Europea de la Industria Fotovoltaica (EPIA en sus siglas en inglés), se



© Alain Herzog / EPFL

Las nuevas tecnologías fotovoltaicas, más baratas que las convencionales de silicio, podrían dar la vuelta al panorama del sector. Un ejemplo son las células solares desarrolladas por el físico Michael Graetzel (en la imagen), conocidas como células Graetzel.

espera obtener valores de 0,04 €/kWh en los países del cinturón solar (Mediterráneo sur) hacia 2030.

Otra manera de valorar los costes es a partir de las inversiones necesarias para montar una planta solar. En el 2010 se estimaba que la inversión por kW de potencia instalada era de unos 2.800 euros. Los estudios financieros hechos tanto en Europa como en EEUU exigen que los costes de instalación disminuyan paulatinamente hasta situarse por debajo de los 1.000 euros a partir de 2030, incluyendo tanto el módulo, como el BOS (*body of system*) y el inversor; también habría que alargar la vida media del módulo más allá de los 25 años, en lugar de los 15 actuales. Con esta estrategia se asegura poder abordar costes del kWh por debajo de los 10 céntimos de euro, esperando significativos avances en investigación que permitan aumentar las eficiencias para mantener opciones de precios LCOE aceptables.

Es frecuente preguntarse cuál de las tecnologías existentes es la que tiene más futuro, y si es preciso apostar por alguna en detrimento de las otras. Obviamente, no todas presentan las mejores previsiones para alcanzar la requerida disminución de costes. Por



© Asociación Española de la Industria Termoelectrónica

ejemplo, hoy en día las tecnologías de capa fina (CdTe, CIS...) están ya mejor posicionadas cerca del umbral de costes. Sin embargo, todavía existen otros criterios para evaluarlas, los cuales hacen referencia a la disponibilidad de materias finas. Así, si se quiere instalar un campo solar de un gigavatio con CdTe, se necesitarían aproximadamente unos 100 km². Teniendo presente que por m² de capa fina, de 2 mm de grueso, hacen falta 6,3 g de telurio, serían necesarias 630 toneladas de este elemento, sin embargo, según datos del 2002, la producción tan solo alcanzaba 1.300 toneladas, circunstancia que haría imposible una producción superior a dos gigavatios. Aunque se haga un esfuerzo de producción, hay límites físicos y económicos que hacen no previsible más de 5.000 toneladas. De la misma forma, otros elementos típicos de la industria fotovoltaica se ven afectados: el germanio (concentradores fotovoltaicos, aleaciones de silicio y germanio, células aSi:mSi de silicio amorfo y multicristalino), el galio y el selenio (CIGS: material semiconductor hecho de cobre, indio, galio y selenio), el rutenio (integrando las *dye-sensitized solar cell* o células solares de bajo

**«BASTARÍA UNA SUPERFICIE
DE RECEPTORES
FOTOVOLTAICOS
EQUIVALENTE A UNA
VEINTENA PARTE DEL
DESIERTO DEL SÁHARA
PARA PRODUCIR TODA
LA ENERGÍA PRIMARIA
CONSUMIDA ACTUALMENTE
POR LA HUMANIDAD»**

coste) o la plata. Eso limita la capacidad de producción y obliga a hacer una utilización global de todas las fuentes⁶ para conseguir la instalación, en años sucesivos, de la capacidad necesaria. A pesar de estas limitaciones, teniendo cuidado con el reciclaje y con la capacidad de producción mundial acumulativa, sería factible cubrir instalaciones capaces de producir energía solar por encima de los siete teravatios.

La energía solar interceptada por la Tierra, en definitiva, es enorme. Podemos transformarla en energía térmica, química o eléctrica. Aunque hay varios mecanismos, la forma más desarrollada es la basada en el efecto fotovoltaico, un campo que, en estos últimos cincuenta años, ha desarrollado varias generaciones de celdas y módulos con diferentes niveles de eficiencia y costes. La primera generación se basa en semiconductores mono y policristalinos; la segunda está ligada a los desarrollos en capa fina y las nuevas generaciones introducen nuevas estrategias⁷ para obtener alta eficiencia o

bajo coste.

En todos los casos, la energía solar tiene el reto de disminuir costes a menos de 1€/W_{pico} o de pocos céntimos de euro (<4) por kWh para presentar un coste LCOE competitivo. Finalmente, hay que mencionar que la abundancia y disponibilidad de algunos de los elementos implicados es crítica y condiciona la existencia simultánea de varias tecnologías para alcanzar la capacidad de conversión de energía suficiente para una sociedad sostenible. ☺



Las centrales termosolares capturan energía térmica, no luminosa, mediante espejos parabólicos que calientan un fluido contenido en un tubo o mediante espejos planos que calientan un único elemento central situado en una torre. Este fluido caliente acaba moviendo una turbina y generando electricidad. Últimamente, estas centrales termosolares de concentración han incorporado un sistema que puede fundir sales (500 °C y más) capaces de liberar el calor desacoplado de las horas de insolación, es decir, que pueden generar electricidad día y noche. En la imagen, planta termosolar PS10 en Sanlúcar la Mayor (Sevilla).

BIBLIOGRAFÍA

EPIA, 2011. *Solar Photovoltaics. Competing in the Energy Sector*. European Photovoltaic Industry Association. Bruselas. Disponible en: <<http://www.epia.org>>.
LEWIS, N. S. y G. CRABTREE (eds.), 2005. *Basic Research Needs for Solar Energy Utilization. Report on the Basic Energy Sciences Workshop on Solar Energy Utilization*. Office Basic Energy Sciences. US Department of Energy. Washington DC. Disponible en: <<http://science.energy.gov/bes/news-and-resources/reports/abstracts/#SEU>>.

Joan Ramon Morante, Jefe del Área de Materiales Avanzados para la Energía. Instituto de Investigación en Energía de Cataluña (IREC).

⁶ En este sentido, el IREC lleva a cabo el proyecto KEST-PV para desarrollar células solares eficientes de kesterita para tecnologías fotovoltaicas sostenibles de bajo coste. Podéis encontrar más información en la web del instituto: <<http://www.irec.cat>>.

⁷ Un ejemplo es el proyecto SCALENANO, con el que el IREC desarrolla y amplía materiales y procesos nanoestructurados para sistemas fotovoltaicos basados en calcogenuros de alta eficiencia y bajo coste. Más información: <<http://www.irec.cat>>.

