

ACADEMIA DE INGENIERÍA

LA ELECTRICIDAD SOLAR FOTOVOLTAICA,
¿UNA TECNOLOGÍA SOLIDARIA O TAMBIÉN
UNA ALTERNATIVA ENERGÉTICA?

DISCURSO DEL ACADÉMICO

EXCMO. SR. D. ANTONIO LUQUE LÓPEZ

LEÍDO EN LA SESIÓN INAUGURAL DEL AÑO ACADÉMICO
EL DÍA 30 DE ENERO DE 2001



MADRID MMI

LA ELECTRICIDAD SOLAR FOTOVOLTAICA,
¿UNA TECNOLOGÍA SOLIDARIA O TAMBIÉN
UNA ALTERNATIVA ENERGÉTICA?

ACADEMIA DE INGENIERÍA

LA ELECTRICIDAD SOLAR FOTOVOLTAICA,
¿UNA TECNOLOGÍA SOLIDARIA O TAMBIÉN
UNA ALTERNATIVA ENERGÉTICA?

DISCURSO DEL ACADÉMICO

EXCMO. SR. D. ANTONIO LUQUE LÓPEZ

LEÍDO EN LA SESIÓN INAUGURAL DEL AÑO ACADÉMICO
EL DÍA 30 DE ENERO DE 2001



MADRID MMI

Editado por la Academia de Ingeniería

© 2001, Academia de Ingeniería

© 2001 del texto, Antonio Luque López

ISBN: 84-95662-01-9

Depósito legal: M-1.721-2001

Impreso en España

Distinguidas Autoridades.
Señores Académicos.
Señoras y Señores:

Deseo expresar ante todo mi agradecimiento al Presidente y a mis compañeros de Academia, por haberme encargado pronunciar este año la lección inaugural de esta docta institución. Me siento profundamente honrado por este encargo que creo que, dada la reconocida *auctoritas* de la audiencia, puede tener una notable influencia. Sin embargo me apresuro a pedir indulgencia ante la certeza de no poder estar a la altura de algunos de los Académicos que me han precedido en dirigirse a la institución.

En esta lección se pretende justificar la tesis de que la industria fotovoltaica va a llegar a ser muy importante en las próximas décadas.

Pero además, de acertar en hacer cristalizar innovaciones tecnológicas que son posibles, permitirá que una fracción sustancial de la electricidad mundial —quizá el 20% para mediados del siglo XXI— sea de origen solar. Esto conllevaría un negocio del orden de los 156.000 millones de euros anuales, lo que para España, supuesta una cuota razonable —del 5,5% que hoy producimos— representaría una cifra del orden del actual negocio eléctrico.

Acertar es una tarea que corresponde a la humanidad en su conjunto, pero también a cada uno de sus miembros aislados o agrupados. Nosotros vamos a exponer lo que creemos poder hacer desde nuestro Instituto de Energía Solar de la Universidad Politécnica de Madrid para contribuir modestamente a esta tarea y también para que España obtenga de ella el mayor beneficio posible. Para ello, describiremos la invención e industrialización de las células solares bifaciales, que ha ayudado a un posicionamiento español en conversión fotovoltaica y luego, nuestra contribución a la segunda y tercera generación de convertidores fotovoltaicos.

En 1999 el conjunto de los fabricantes de células solares vendió un total de ellas capaces de producir 200 MW. El crecimiento interanual había sido del 30%. Probablemente ese año se superó el primer gigavatio (1.000 MW) de células solares instaladas en el mundo, la inmensa mayoría en pequeñas instalaciones que no exceden los 5 kW. El pasado mayo, durante la

conferencia fotovoltaica europea, los fabricantes decían estar ya sin existencias y los comerciales se quejaban de no tener con qué atender los deseos de sus clientes. Muchas compañías anunciaban ambiciosos planes de expansión. En un suelto de prensa de 15 de noviembre del 2000, *PR Newswire* señala que «Siemens Solar ha tardado 20 años en vender sus primeros 100 MW y sólo cuatro años en vender los segundos».

En la pasada cumbre del G8, en Okinawa, se anunciaba que Tony Blair apoyaba un plan de energía solar para los pobres del mundo: los líderes habían aceptado —continuaba el comunicado— embridar las energías renovables y mejorar la salud, para dos mil millones de personas en el tercer mundo. Días después aparecía un suelto de *Reuters* cuyo titular reza «Londres RU, 27/07/00, El Primer Ministro Tony Blair ha dicho ayer, que Mark Moody-Stuart, presidente del gigante petrolero anglo-holandés Grupo Shell, ha sido nombrado para copresidir la Fuerza Operativa del G8 para Energía Renovable».

Refiriéndonos a acciones en países altamente industrializados, podíamos leer esta noticia de *Reuters*: «Tokio, Japón, 17/07/00. Las compañías eléctricas del Japón han desvelado un programa de permitirá a los clientes contribuir a un fondo para la promoción de las energías eólica y solar cuando paguen su factura de la electricidad» o un artículo de Amy Zipkin aparecido el 12 de noviembre de 2000 en el *New York Times* en Internet, que bajo el título «La venganza de las familias (*homeowners*): vender energía a la eléctrica» relata la experiencia de cierto usuario y se extiende luego en las iniciativas, logros y apoyos que las diversas Administraciones de los EEUU proporcionan a la instalación de energía fotovoltaica conectada a la red, y señala también brevemente algunas incomprensiones.

No cabe duda de que el negocio fotovoltaico se está calentando por doquier, también en España, donde el Real decreto 1663/2000 ofrece a los productores de energía fotovoltaica unas 66 ptas./kWh, en línea con la normativa que ha convertido Alemania en el mayor mercado europeo.

Y hay razón para ello. De acuerdo con R. Sadourny¹ de no tomarse medidas, para mediados del siglo XXI nos encontraríamos emitiendo a la

¹ R. Sadourny, «L'homme, modifie-t-il le climat?», *La Recherche*, N.º 243, mayo 1992, págs. 522-531.

atmósfera unas 25 Gt por año de carbono en forma de dióxido, que es más del 10% de los intercambios naturales entre ésta y la superficie de la tierra y los océanos. Existen pues buenas razones para promover el uso de las energías renovables. A ello vienen conferencias como la inicial de Río de Janeiro en 1992, la más reciente de Kioto de 1997, o la última de La Haya de noviembre de 2000, en la que, pese a las reticencias de muchos, los Estados han adoptado ya compromisos onerosos respecto a la reducción de emisiones contaminantes.

Un estudio de escenarios presentado a la cumbre de Río, estableció que el uso intensivo de las energías renovables, incluyendo entre otras cosas la producción de electricidad solar antes mencionada, estabilizaría las emisiones de dióxido de carbono (y otros contaminantes) a niveles inferiores a los de 1985, es decir, de unas 4 Gt de carbono por año.

No cabe duda de que hay mucho de apoyo proteccionista en las medidas que se plantean. Seguramente se basa en la esperanza de que estas medidas estimularán la consolidación de una opción alternativa limpia y económicamente viable. En todo caso, el crecimiento actual se está produciendo a pesar de que la electricidad fotovoltaica cuesta unas cinco veces más que la convencional. En parte se financia con subvención, otras veces, por lo aislado del lugar, es la opción más económica, pero tampoco es infrecuente que los ciudadanos estén dispuestos a pagar el sobreprecio necesario como signo de distinción y de su compromiso con el ambiente, ya sea institucionalmente en edificios de prestigio o en sus propios domicilios. En unos y otros, la integración de los módulos fotovoltaicos se hace a veces siguiendo los más refinados criterios de famosos arquitectos.

En resumen, no parece haber duda de que por diversas circunstancias la energía solar fotovoltaica tiene por delante una década, al menos, de expansión muy notable. Si realmente consigue reducir los precios razonablemente su expansión llegara a ocupar una fracción importante de la producción eléctrica.

Puede sorprendernos saber que España fue en 1999 el mayor fabricante de células solares de Europa, produciendo unos 11 MW en sus dos factorías, una de Isofotón en Málaga (6 MW), y la segunda de Europa en producción y otra de BP Solar en Madrid (5 MW), la tercera de Europa.

En el *ranking* mundial BP Solar, con fábricas además en EEUU, donde tiene su central, Australia e India, fue la primera compañía, con una producción consolidada de 34 MW. Pero Isofotón, con exportaciones del 75% de su producción en un total de 40 países, es la séptima mundial, tras Kyocera, Sharp, Siemens o Sanyo, entre otras, pero por delante de Mitsubishi, por ejemplo. Isofotón ha anunciado recientemente sus planes de expansión que implicarían quintuplicar la capacidad de producción, llegando a los 30 MW. BP solar habla de quizá 100 MW en Europa, y España es un sólido candidato.

Por lo que se refiere a la investigación, debe de haber en España dos docenas de grupos que totalizarían un centenar de investigadores, de los cuales mi Instituto, con más de 40 personas, es el mayor; pero donde centros menores hacen a veces trabajos brillantísimos. En la última Conferencia Mundial Fotovoltaica en Viena en 1998, España fue, tras Alemania, EEUU y Japón, el país que presentó más comunicaciones.

* * *

¿Qué principio gobierna a las células solares? Están hechas de un material semiconductor; hoy día generalmente el silicio cristalino; el mismo que se usa para la fabricación de los famosos chips microelectrónicos. En un semiconductor los fotones o cuantos de luz de suficiente energía bombean a los electrones desde la llamada banda de valencia, donde suelen encontrarse, a la llamada banda de conducción, más energética. Ambas bandas están separadas en el eje de energías por la llamada banda prohibida. Desde esta banda de conducción los electrones pueden extraerse a un circuito exterior mediante un contacto metálico hecho en una región llamada «tipo n», fabricada dopando localmente, es decir, impurificando localmente el semiconductor con un elemento químico adecuado; fósforo, por ejemplo, en el caso del silicio. Tras perder su energía en realizar el trabajo eléctrico que se desee (encender luces, poner en marcha la lavadora, etc.), los electrones se retornan a la banda de valencia del semiconductor en cuestión mediante otro contacto a una región llamada «tipo p», dopada con otro elemento químico; por ejemplo, boro en el silicio.

El nacimiento de Isofotón se originó con la invención en 1976 en la Universidad Politécnica de Madrid de la célula bifacial. Las células solares

convencionales sólo son activas por su cara frontal, no sólo porque la cara posterior de la célula esté recubierta de un contacto metálico opaco, sino también porque sólo electrones bombeados en la proximidad de la superficie frontal son entregados al circuito externo. Los pocos generados hacia el interior vuelven a caer en la banda de valencia a través de los procesos llamados de recombinación.

Durante una década, a partir de 1974, se lanzó una investigación ambiciosa en la que se examinaron tres tipos de posibles células bifaciales. La finalmente elegida para industrializarla se basó en usar un material de base menos dopado de lo habitual, en el que la recombinación era menor, y añadirle un dopaje de boro adicional en la cara posterior para asegurar un buen contacto a la banda de valencia. El buen comportamiento de estas células sorprendió a sus inventores, y se explicó por un modo de operación —en alta inyección— que no se aplicaba en la fecha para la interpretación de las células solares.

En la célula bifacial el contacto posterior, como es usual en el frontal, se hacía mediante una rejilla metálica para dejar pasar suficiente luz.

La motivación inicial para desarrollar las células bifaciales fue, en realidad, su uso en concentradores estáticos que ahorraran el costoso silicio. Estos concentradores, sin órganos móviles, habían sido desarrollados poco antes para aplicaciones térmicas por Roland Winston y sus colaboradores del Instituto Fermi de la Universidad de Chicago. El básico teorema de la conservación del brillo limita el valor de la concentración alcanzable con un sistema estacionario. El uso de células bifaciales permitía duplicar la concentración alcanzable que en teoría podía llegar hasta alrededor de ocho. Se fabricó un prototipo de concertador estático con una concentración de alrededor de cuatro.

Sin embargo se descubrió pronto una solución que parecía mucho más simple y apta para la comercialización inmediata consistente en encapsular las células bifaciales en módulos semejantes a los de las células convencionales, pero con la cara posterior transparente, y pintar de blanco el entorno en el que se iban a instalar los módulos. Son los llamados módulos colectores de albedo. Una superficie nevada hace caer en la cara posterior del módulo el 80% de la energía incidente en la frontal, y un die-

dro de dimensiones medianas colocado tras el módulo da un albedo de más del 50%, aunque en configuraciones típicas éste no supera el 35%. Con este bagaje se fundó Isofotón en 1981, y las células bifaciales salieron al mercado a partir de 1982.

Estas células, cuya producción redujo mucho Isofotón desde 1987 en favor de las células solares convencionales, por estimar que la eficiencia adicional del acondicionamiento del albedo no compensaba el ligero sobreprecio de fabricación y las dificultades añadidas de comercialización, han sido objeto de un renovado interés desde 1995, año en el que demostramos la eficiencia, confirmada externamente, de 18,2% por la cara frontal y 19,1% por la posterior. A partir de entonces, los laboratorios de mayor reputación desarrollaron células bifaciales consiguiendo los mejores resultados el Instituto Faunhofer de Energía Solar, en Friburgo, con más del 20% por cada cara. Esto da lugar a rendimientos efectivos (no considerando en el denominador la entrada de una energía posterior de un 50% de la frontal) de más del 30%, inalcanzable con silicio por otros medios (récord, 24,7 % en la UNSW, Sidney). También hay pruebas fehacientes de que el interés industrial (extinguidas ya por cierto nuestras patentes) se ha incrementado.

En un consorcio internacional dirigido por Isofotón, estamos transfiriendo a ésta las nuevas tecnologías de células bifaciales de mayor rendimiento, y desarrollando además un concentrador estático arquitectónicamente integrable a partir de conceptos desarrollados también en el Instituto.

Hoy, la tendencia general para abaratar los costes de fabricación de las células de silicio incluye como aspecto fundamental la reducción de su espesor. Para esto es preciso realizar algún tipo de reflector de electrones en la cara posterior, que es precisamente lo que tienen nuestras células bifaciales. Además, se necesita un reflector de fotones para que no escapen los que atraviesan la delgada célula. Hemos demostrado que la interfaz silicio-aire de la cara posterior de las células bifaciales, por virtud de la reflexión total interna, constituye un excelente y sencillo y reflector de fotones, preferible a sus alternativas. En consecuencia, ya sea para iluminación monofacial o bifacial, la célula bifacial va a ser probablemente la opción preferida para las células delgadas de silicio que se avecinan.

Dick Swanson, de *Sunpower Corporation*, en un artículo invitado² en *Progress in Photovoltaics* compara los costes potenciales de una docena de tecnologías fotovoltaicas. Para una instalación pequeña en un área climáticamente no muy favorable (Boston), la opción más barata resulta ser el concertador estático, seguido de las populares capas delgadas, de las que ya hablaremos, que sin embargo van *ex aequo* con los módulos colectores de albedo.

* * *

El pasado septiembre he asistido en Sidney a la puesta en marcha del Centro Especial de Tercera Generación Fotovoltaica, que dirige Martin Green, Académico Correspondiente de esta institución.

La idea rectora de una tercera generación es aumentar drásticamente el rendimiento anual de sol a electricidad, desde el 10% que puede ser típico hoy en una instalación fotovoltaica muy bien gestionada, a partir de células industriales del 15% de rendimiento en condiciones estándar; a un 20% de rendimiento anual a partir de células industriales del 30-35% de rendimiento estándar. De esta manera estimamos que podría lograrse un abaratamiento de la electricidad solar que permitiría una penetración masiva.

Hablar de tercera generación requiere hablar de la primera y de la segunda. Por primera generación entendería yo la célula de silicio, que con una tecnología bastante homogénea, constituye la casi totalidad del mercado actual. Por segunda generación las células hechas con nuevos materiales, nuevos procedimientos o bien los sistemas de concentración, incluyendo los concentradores estáticos ya mencionados.

Desde muy antiguo se ha buscado una alternativa al silicio cristalino —que algunos juzgan no ideal— como material fotovoltaico. La primera opción con éxito parcial fue el silicio amorfo hidrogenado, fabricado en descarga de plasma, a partir del silano. Se hizo un vigoroso esfuerzo, a mi juicio prematuro, de industrialización, que se truncó por la constatación de una importante degradación inicial de la eficiencia, por los bajos valores

² R.M. Swanson, *Progress in Photovoltaics* **8**, 93-111 (2000).

de ésta y probablemente por los elevados costes que origina el rechazo de módulos defectuosos en una tecnología que todavía no se entiende suficientemente. Hoy esta opción retiene sin embargo el 10% del mercado generalmente para aplicaciones tipo calculadoras y similares.

Hay otras opciones que llevan también bastante tiempo desarrollándose y se encuentran ya hoy en fase de planta piloto. Se trata del CIGS (diseleniuro de cobre indio y galio) y del CdTe, (telururo de cadmio), presentando ambas un buen rendimiento aunque bastante inferior al del silicio.

Jack Kilby, el último Nobel de Física, ha inventado y desarrollado en Texas Instruments un procedimiento muy original de fabricar células solares baratas de silicio. Se hace pasar por unas boquillas silicio fundido de baja calidad que se solidifica así en gotitas diminutas. En ellas las impurezas se segregan a la superficie, de las que es más ávida y se eliminan con un decapado químico. Luego se les difunde fósforo en la superficie para formar el contacto de la banda de conducción y se colocan en una bandeja de aluminio en la que por calentamiento hasta el eutéctico se forma el contacto a la banda de valencia. Por su relativamente bajo rendimiento, de hasta el 10%, el producto no ha sido comercializado todavía.

* * *

Los sistemas de concentración forman también parte de la segunda generación. En ellos se separan las funciones de colección de la energía solar, que corresponde a un elemento óptico de bajo coste y de conversión en electricidad, que corresponde a la célula solar. Al recibir ésta la energía colectada por una gran área de elemento óptico colector, produce una cantidad importante de electricidad que probablemente podrá pagar células más complejas y por ello más eficientes.

Este tipo de soluciones es también muy antiguo; pero prácticamente no existe hoy ninguna aceptada por el mercado. Una de las razones es que están ausentes en estas soluciones las cualidades principales apreciadas por los usuarios de la electricidad solar. Estas cualidades son modularidad, fiabilidad y capacidad de integración arquitectónica. En estas circunstancias, los sistemas de concentración han de ganar su mercado por

precio, y por puro precio no pueden competir hoy con las energías convencionales.

Hay excelentes células de concentración desarrolladas en laboratorio, pero estas células debido a la exigüidad de los mercados, no se fabrican para la venta, o si se hacen de encargo, resultan a un precio prohibitivo, principalmente por la necesidad de cargar gastos fijos en un producto de poquísima salida. La investigación, y sobre todo el desarrollo, sobre sistemas de concentración es por lo tanto escaso, y casi incapaz de entrar en una fase de producción piloto necesaria para apreciar las ventajas de costes que pudiera haber. Sin embargo, de poder vencerse estos impedimentos iniciales es muy probable que los sistemas de concentración puedan ser sensiblemente más baratos que los actuales sistemas fotovoltaicos.

¿Cómo salir de este *impasse*? Nosotros lo estamos intentando juntamente, con BP Solar, mediante el uso de las células de alto rendimiento que esta compañía fabrica en Madrid, las cuales han sido modificadas para constituir un producto que puede trabajar eficazmente con factores de concentración de 30. Los costes de este producto no deben ser muy superiores a los de la célula fabricada habitualmente en BP Solar, en Madrid. Con esta idea se realizó en nuestro Instituto un prototipo de concentrador —el EUCLIDES— al que ha seguido una planta de demostración en Tenerife de 480 kW, la mayor del mundo. Nuestra tecnología ha sido cedida en licencia a BP Solar.

El experimento es muy interesante. Se confirma que este tipo de soluciones tendría sólo el 60% del coste actual de una planta fotovoltaica sin concentración. Al tiempo han aparecido problemas de rendimiento y de fiabilidad que parecen haberse resuelto pero que nos sugieren que conviene reexaminar alguna de las soluciones escogidas. La citada segunda generación fotovoltaica, en concentración, no esta todavía disponible, pero la instalación de la gran planta de Tenerife es un paso importante para acercarnos a una solución comercializable, y naturalmente la industria y la tecnología españolas se tienen asegurado un lugar importante si la solución comercializable se materializa.

* * *

Pero hablemos ahora de la tercera generación, que puede llegar detrás de la segunda o incluso sustituirla antes de que aquélla eclosione. William Shockley, el premio Nobel que inventó el transistor; y Hans Queisser, establecieron en 1961 el límite de rendimiento de una célula solar. Naturalmente, para hacerlo definieron con precisión qué entendían por célula solar. Pues bien, por células de tercera generación entendemos aquellas que se basan en principios capaces de superar el límite de Shockley y Queisser.

Es posible superarlo fabricando apilamientos de células solares ordinarias de distintos materiales, que llamamos en tándem, tales que los fotones más energéticos son absorbidos en la primera célula hecha con un material de gran banda prohibida, que por lo tanto bombea los electrones que suministra al circuito externo con más energía. Los fotones con menos energía pasan a la siguiente célula donde los electrones son bombeados y suministrados con energía también menor y así sucesivamente. El rendimiento alcanzable en teoría con un número infinito de células en esta configuración es altísimo, del orden de 86%. Con tres materiales —fosforo de indio y galio sobre arseniuro de galio sobre germanio—, se han conseguido ya en la compañía americana *Spectrolab* en colaboración con el Laboratorio Nacional de Energías Renovables, (NREL) de EEUU, rendimientos del 32,2 %. Estas células se están desarrollando sobre todo para el mercado espacial, donde el rendimiento es importante y el precio importa mucho menos. Para el mercado terrestre son muy caras, pero este inconveniente queda soslayado si puede trabajar con un factor de concentración del orden de 1.000. Zhores Alferov, el reciente Nobel laureado juntamente con Kilby, tuvo un papel seminal en el desarrollo de éste tipo de células, junto con Slava Andreev, Académico Correspondiente de nuestra institución.

Cuanto mayor es la concentración, mayor es la precisión requerida por los elementos de puntería y mayor su coste. Pero en nuestro Instituto se han descubierto singulares técnicas de diseño que permiten estas concentraciones con una gran tolerancia de puntería. Estos diseños están siendo desarrollados en parte para la compañía americana *Sunpower*, (con acuerdos de licencia), que fabrica células solares de silicio de concentración muy especiales y también con una empresa japonesa subsidiaria de JVC para comunicaciones ópticas.

Con estos elementos hemos desarrollado el concentrador HERCULES en el que se usan células de concentración de AsGa fabricadas por nosotros conjuntamente con Andreev y su equipo del Instituto Ioffe de San Petersburgo (que dirige Alferov), con las que hemos demostrado en 1999 un rendimiento del 26% a concentración de 1.000 veces la irradiancia solar normal, confirmado externamente, que ha sido durante un año el mayor del mundo a esta concentración. Estas células se han integrado en nuestra óptica de factor de concentración también de 1.000 con buenos resultados. En el momento actual se continúa trabajando en un proyecto internacional liderado por Isofotón, para realizar un módulo de dicho factor de concentración y de 20% de rendimiento con aspecto y tamaño muy parecidos a los habituales en los sistemas fotovoltaicos sin concentración. En este módulo para los procedimientos de ensamblaje de células usan las técnicas de fabricación de diodos LED —los pilotos usados en nuestros electrodomésticos— que permiten producción masiva a bajo coste. Según Swanson, (*op. cit.*) ésta sería la opción fotovoltaica más barata para grandes sistemas fotovoltaicos en regiones soleadas. Naturalmente, el fin último de este desarrollo es ofrecer módulos con células en tándem o cualquier otra solución de tercera generación.

Masafumi Yamaguchi, del *Toyota Institute of Technology*, y yo mismo, en un artículo en el *IEEE Transactions on Electron Devices*³, hemos considerado que a largo plazo, usando la tecnología HERCULES, células en tándem de rendimiento 40-45%, y tras un aprendizaje razonable, el coste de la electricidad puede reducirse a tres centavos y medio de dólar por kWh en zonas climáticas favorables. Con estos costes —la tercera parte de los precios actuales de venta de la electricidad y semejantes a los precios medios de producción por las técnicas al uso— la expansión de la energía solar a los niveles señalados al comenzar esta lección, estaría asegurada.

* * *

Pero puede haber tecnologías alternativas. En 1997 publiqué con Antonio Martí un artículo⁴ en *Physical Review Letters* en el que proponíamos un nuevo tipo de célula que sobrepasaba los límites de Shockley y Queis-

³ M. Yamaguchi y A. Luque, *IEEE Transactions on Electron Devices* **46**, 2139-2144, (1999).

⁴ A. Luque y A. Martí, *Physical Review Letters* **76**, 5014-5017 (1997).

ser. Esta célula se basa en el principio de usar dos fotones para bombear un electrón desde la banda de valencia a la de conducción. Para ello se usa una banda intermedia de energía situada en el centro de la banda prohibida, de manera que uno de los fotones bombea el electrón desde la banda de valencia a esta banda intermedia, y el segundo desde ella a la de conducción.

Los cálculos establecen un límite de rendimiento del 63,4% para este dispositivo, mejor aún que el de las células en tándem de dos materiales. En el momento actual, mediante complejo cálculo de bandas se han identificado en el Instituto dos nuevos materiales que podrían exhibir la estructura de bandas buscada. También el uso de la nanotecnología, y en particular de redes de gotas cuánticas, permitiría también las bandas intermedias deseadas. Acabamos de conseguir un proyecto de la Comisión Europea para demostrar experimentalmente estos conceptos.

* * *

En resumen, hemos intentado transmitir los indicios del apoyo generalizado que la expansión de la electricidad fotovoltaica suscita hoy. Estos apoyos garantizan, creemos, una década de crecimiento intenso. Pero, más allá, es preciso, pensamos, el nacimiento de una tercera generación de células solares que permita abaratamientos sustanciales de los precios actuales de la energía. Creemos que el simple aprendizaje continuado de las tecnologías existentes hoy será suficiente para una acción solidaria —muy encomiable sin duda— de dar electricidad a los pobres del mundo, pero no permitirá la construcción de una alternativa energética que permita que esos pobres dejen de serlo.

En el Instituto de Energía Solar tratamos de ofrecer soluciones a la industria, a veces con éxito reconocido, tanto para la actual fase germinal que vivimos como para hacer posible una fase futura de despliegue global.

España, que tanto industrialmente como desde el punto de vista de la I+D tiene hoy en este sector un papel destacado entre las naciones, está conteniendo eficazmente en un mercado global. Creemos que esta vez España puede llegar a tener una presencia muy activa en lo que *The Economist* (5/8/00) en su artículo titulado «La Aurora de la Microenergía»

(*The dawn of micropower*) califica de un posible despertar del sector energético en el que el paradigma de que la electricidad —como el teléfono antes— nos haya de venir a través de una red sin alternativas, puede verse roto por nuevas tecnologías energéticas, la fotovoltaica entre ellas, que pueden convertir la generación y distribución de energía en un nuevo entorno hiperactivo de negocio como lo es hoy el de las telecomunicaciones, que antes sesteaban en su cómodo monopolio.

Así, de desarrollarse las cosas como pretendemos tendría razón el ilustre físico Freeman Dyson que resume en su título: *El sol, el genoma e Internet: las tres cosas que revolucionarán el siglo XXI*⁵ la tesis de su reciente libro.

He dicho.

(Texto preparado en Madrid, en noviembre de 2000.)

⁵ Freeman Dyson *El sol, el genoma e Internet: las tres cosas que revolucionarán el siglo XXI*, Madrid, Debate, 2000. 1.ª edición original Oxford Univ. 1999.

