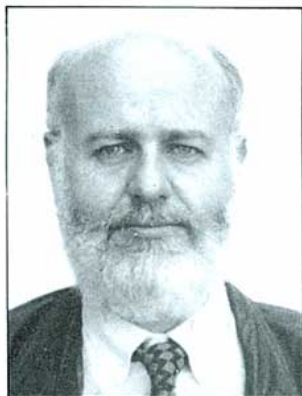


Justamente ahora que se celebra el décimo aniversario de BIT podríamos también celebrar el décimo aniversario y la conclusión del primer plan a largo plazo establecido según nuestros datos por una administración pública, la estadounidense, para el desarrollo de la energía solar fotovoltaica. Es pues tiempo de revisar sus logros y sus fallos junto con los que desde la Escuela hemos tenido, y plantear el futuro de esta fuente de energía y de nuestra actividad.

Es bien sabido que la electricidad fotovoltaica se basa en el uso de la tecnología de semiconductores: Una célula solar es en esencia un diodo semiconductor, y como tal, cuando se somete a iluminación tiene un cuadrante de su curva I-V en el que se comporta como



Antonio Luque. Doctor Ingeniero de Telecomunicación desde 1967, y Catedrático de Electrónica de la E.T.S.I.T.M. desde 1970. En 1980 funda la empresa Isofotón. En la actualidad es Director del Instituto de la Energía Solar de la Universidad Politécnica de Madrid.

Semiconductores y energía: Diez años de electricidad fotovoltaica

Texto: Antonio Luque

generador de energía. El objetivo es, pues, conseguir alto rendimiento de conversión energética, buena estabilidad a la intemperie y a los efectos degradantes de la iluminación solar y bajo coste.

Acerca de las propiedades de diodos semiconductores bajo iluminación hay noticias antes de que se entendiesen las propiedades eléctricas de estos materiales. Mencionemos, por ejemplo, los trabajos de W.G. Adams y R.E. Day sobre uniones Se/Pt iluminadas por concentradores en 1876. Pero la célula solar en su forma moderna hay que buscarla en los trabajos de Chapin, Fueller y Pearson en 1954 quienes obtienen un rendimiento del 6%. Las células solares son pronto aplicadas a proyectos espaciales y forman parte de los vehículos espaciales desde 1958. En 1973, con la guerra árabe-israelí de los seis días y los embargos de petróleo subsiguientes, se produce una ola de renovado interés por fuentes renovables de energía (fuentes de potencia) de las que la solar es la más importante por su universalidad y abundancia. Medios termodinámicos y fotovoltaicos se aplican a la producción de electricidad y, debido a su modularidad, son los fotovoltaicos los primeros que alcanzan un mercado real, aunque todavía de moderado volumen.

EXPERIENCIAS PASADAS

El plan estadounidense se desarrolla en tres ámbitos fundamentales: Silicio cristalino, concentración y células de capas delgadas.

En el primero se distinguen tres tipos de actividad: polisilicio de grado solar; crecimiento del cristal; células y paneles.

La célula solar se fabricaba con el mismo polisilicio, de grado electrónico, usado para la microelectrónica. Surge la duda de si en

una consideración coste-rendimiento no sería posible usar una materia prima mas barata, máxime teniendo en cuenta que está representaba al menos un tercio del coste total del panel, y se pensaba que su peso sería aún mayor cuando los paneles bajasen de precio. Por un lado se intenta sustituir el método de Siemens, universalmente usado para la obtención del silicio ultrapuro, por otro mas económico, ya sea manteniendo el nivel de pureza, ya sea reduciendo éste hasta los límites necesarios.

Manteniendo la pureza las alternativas son menores, pero posibles. Soluciones existen pero los mercados son escasos. Todo el silicio usado hoy en células solares no basta para justificar la instalación de una fábrica de polisilicio de alta pureza por nueva tecnología, y no se ha producido hasta el momento, (según nuestros datos) una decisión industrial de ir adelante por esta vía existiendo, como existen, otras alternativas aparentemente más prometedoras.

La alternativa de una purificación más ligera, apropiada para su integración en la propia fábrica de células solares no ha dado, en mi opinión, resultados positivos. Una serie de fábricas en EE.UU. y en Europa, están involucradas en estos trabajos pero se ha probado suficientemente que la célula solar necesita un silicio de pureza superior a la que ofrecen estas purificaciones simples. Prácticamente necesita el grado electrónico, quizás con exigencias algo relajadas.

En crecimiento cristallino la tendencia de más éxito ha sido el sustituir el crecimiento monocristalino por uno semicristalino, de grandes cristales, obtenido por colada u otros métodos, con un comportamiento casi igual al de la célula monocristalina y un coste por lingote del 50 al 70%. Las células policristalinas tienen ya

cerca del 40% del mercado total.

El inconveniente de esta orientación es que requiere el corte del cristal en obleas, lo que es una operación cara, pero en los últimos dos años se han desarrollado máquinas de corte muy rápidas y con pocas pérdidas, que sin embargo no dan la planeidad requerida para la microelectrónica, pero que son suficientes para células solares.

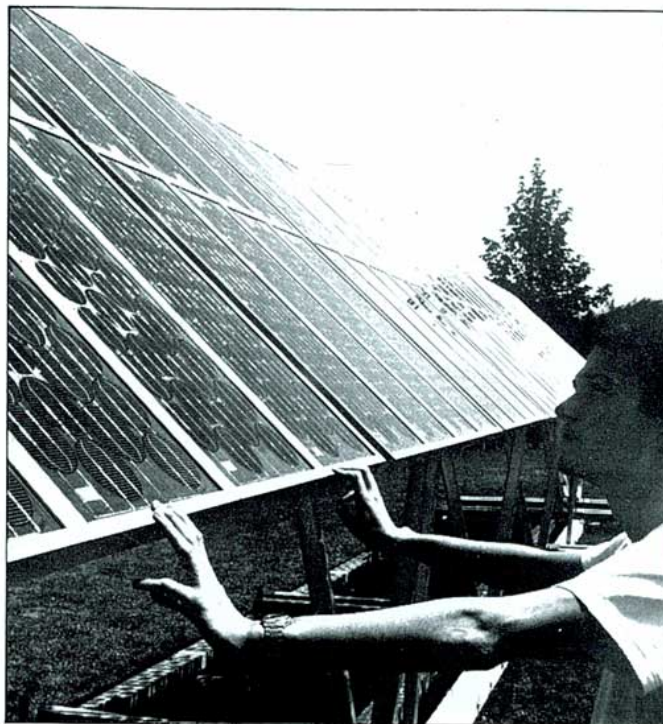
El crecimiento de láminas cristalinas que eviten el corte en obleas no ha tenido suficiente éxito. Westinghouse tiene una tecnología técnicamente adecuada, pero no se decide a comercializarla. La única tecnología comercializada (vendida al Japón), de Mobil Tyco, no tiene gran aceptación por la baja calidad de la célula producida.

Los sistemas de concentración tienen el inconveniente que sólo colectan luz solar directa, lo que los hace poco atractivos en la mayoría de los climas, que tienen alta proporción de luz difusa. Además las células usadas son, hoy, demasiado caras y anulan en parte las ventajas de la reducción de área de célula que implica la concentración. Por último los paneles de concentración son demasiado grandes para lo que exige el mercado actual. Como consecuencia sólo en EE.UU. hay compañías de concentración con paneles ligeramente más baratos que los paneles planos, pero capturando cotas de mercado pequeñas.

En lo que se refiere a las células de capa delgada, la falta de estabilidad y el bajo rendimiento de las de sulfuro de cobre/sulfuro de cadmio, han determinado el abandono de la fabricación por parte de las pocas compañías que la iniciaron.

ACTIVIDADES INICIALES DEL GRUPO EN ENERGÍA SOLAR

La actividad de nuestro



“
*La electricidad
fotovoltaica
es la más
barata para la
electrificación
rural de países
en desarrollo.*
”

grupo en el ámbito de la energía solar se remonta a 1974. Se centran en trabajos sobre células de capa delgada de silicio policristalino. Sin embargo este camino se revela con poco futuro de manera que ya en 1975 comenzamos a trabajar en concentradores estáticos capaces de concentrar también la luz difusa, que a partir de los trabajos de Winston en la Universidad de Chicago, habían tenido gran éxito en energía solar térmica y empezamos a analizar su aplicación fotovoltaica.

De hecho no estábamos satisfechos con una simple aplicación. Intuíamos que no era suficiente e intentamos inventar dispositivos mejores. Los fracasos nos llevan a plantear un estudio en profundidad de los límites teóricos de la concentración estática de luz y en 1980 empezamos a publicar las bases teóricas de esta disciplina incluyendo métodos de síntesis muy elegantes y útiles. En 1982 desarrollamos el primer prototipo de concentrador estático capaz de colectar la luz difusa, aunque el rendimiento no

fue satisfactorio. Desde entonces hemos seguido nuestros esfuerzos y hoy estamos a las puertas de una posible industrialización de paneles basados en las técnicas de síntesis antes indicados capaces de una moderada pero real reducción del coste actual de los paneles fotovoltaicos.

Desde el principio comprendimos que el receptor de un concentrador ha de ser iluminado isotrópicamente por las dos caras, si se quiere sacar el máximo partido del concentrador y ya en 1976 habíamos presentado las primeras patentes de células solares bifaciales.

Nos dedicamos varios años a esta tarea. Para 1980, en una de esas raras veces en que la naturaleza juega a favor, las cosas nos salen mejor de lo que predice la teoría habitual, obteniendo simetrías del 100% y con rendimientos excelentes por la cara frontal (del 15%, auditados fuera). Situadas estas células frente a un panel de madera pintado de blanco y se alcanza ¡el 23%! Un sólido trabajo de investigación sobre el comportamiento de células solares en alta inyección termina por explicar su buen comportamiento.

No era rendimiento real; desde luego se debía a que entraba luz no controlada por detrás, pero desde un punto de vista de ingeniería era un gran resultado ya que esta luz se pierde en las células convencionales. Nadie sacaba tanta electricidad de una célula.

Aunque ésta no era la aplicación inicialmente prevista de las células bifaciales, este producto, que llamamos paneles colectores de albedo, se comercializa, creándose para ello Isofotón. Mencionemos que Isofotón es, juntamente con Photowatt de Francia, AEG de Alemania y Pragma de Italia, una de las cuatro industrias europeas fabricantes de células solares a las que se dedica un apartado

especial en el reciente trabajo de Mark Maham publicado como Informe de las Ediciones del Financial Times en 1986, bajo el título "Photovoltaics, a sunrising industry".

Hemos seguido los estudios sobre células de silicio estudiando con detalle las zonas fuertemente dopadas de las células de silicio y se han alcanzado voltajes de circuito abierto de 650 mV a un sol, entre los mejores voltajes del mundo.

Se han desarrollado células simples de AsGa con rendimientos del 18%, razonables para esta tecnología.

Simultáneamente el grupo decide involucrarse también en el área de la concentración con seguimiento. Así solicitamos y obtuvimos la primera ayuda Ramón Areces y fabricamos las células, óptica y mecánica del Panel Ramón Areces y más adelante los paneles MINER e IBERDUERO.

Los trabajos sobre sistemas fotovoltaicos, incluyendo aspectos sociales de su uso, han sido también una actividad del grupo que ha culminado en la electrificación de la aldea de Notto en Senegal y que ahora continúa con proyectos en Cabo Verde, Argelia y en las montañas andaluzas, este último de la marco de las Comunidades Europeas.

Por último el grupo mantiene una actividad en instrumentación de medida y fabricación asociada a las células solares.

ORIENTACIONES FUTURAS

¿Cuál es la situación actual en el mundo? Los objetivos de coste del Departamento de Energía americano no se han cumplido pues mientras proponían 0,8 \$/watio para 1986, el precio real es 4\$/watio. Las causas son complejas y su análisis fuera de lugar aquí. En cambio mientras que el potencial de rendimiento de las células



de silicio en concentración se estimaba en 19-21%, hoy Swanson en Stanford con su nueva célula de contacto de puntos ¡28%!, más que con AsGa o con cualquier otro material (cuyo potencial es aún mayor). Hay pues materia de reflexión..

Hoy se reconoce que la electricidad fotovoltaica es la más barata para la electrificación rural de países en desarrollo (desgraciadamente con escasa capacidad de compra) pero existe duda acerca de la posibilidad de conseguir electricidad fotovoltaica a costes competitivos a los convencionales en sistemas centralizados. Desde luego yo, junto con muchos otros expertos, no participo en este pesimismo, aunque creo que hay fallos graves en la orientación científica que se sigue mayoritariamente.

Se ha abandonado bastante la esperanza de que estos costes competitivos sean posibles con silicio cristalino. Desde luego continúa el desarrollo, ya que es el elemento básico del mercado actual, tan útil en paí-

ses en desarrollo. Pero el mayor énfasis mundial se traslada al silicio amorfo que permite células de capa delgada razonablemente económicas y eficientes, y que de producirse en grandes cantidades y mejorando la actual tecnología a través de una buena dosis de investigación fundamental, podrían quizás producir electricidad competitiva.

La célula de silicio amorfo parte del descubrimiento de Spear en Dundee, hacia 1974, de la posibilidad de formar uniones p-n con este material. Sin embargo, el silicio amorfo tiene una red de enlaces en gran medida insatisfechos lo que produce una alta densidad de centros de recombinación. Para evitarlo es obligatorio incorporar hidrógeno atómico a estos enlaces y esto sólo se ha conseguido hasta ahora (con razonable eficacia) en un plasma de descarga luminescente, por lo que el proceso de fabricación es necesariamente lento y requiere una maquinaria cara. Esta fase amorfa, tiene una gran absorción, de manera que la célula en su conjunto sólo tiene unas micras, frente a las 400 micras de la célula convencional, hecho en el que radica su interés económico. Una célula de silicio amorfo esta formada por una región central poco dopada, de un espesor próximo a una micra, situada entre dos regiones superficiales con dopajes p y n que mantienen un campo colector en la región central.

Los japoneses han atraído el interés mundial por esta célula al introducirla en numerosos productos de consumo para los que no se requiere la calidad necesaria para la generación de energía. En este momento es el producto que suscita mayores expectativas a nivel mundial a juzgar por el dinero dedicado a su desarrollo.

Y no participo del entusiasmo general por este tipo de célula. La razón es que esta célula tiene rendimientos muy bajos, en fabrica-

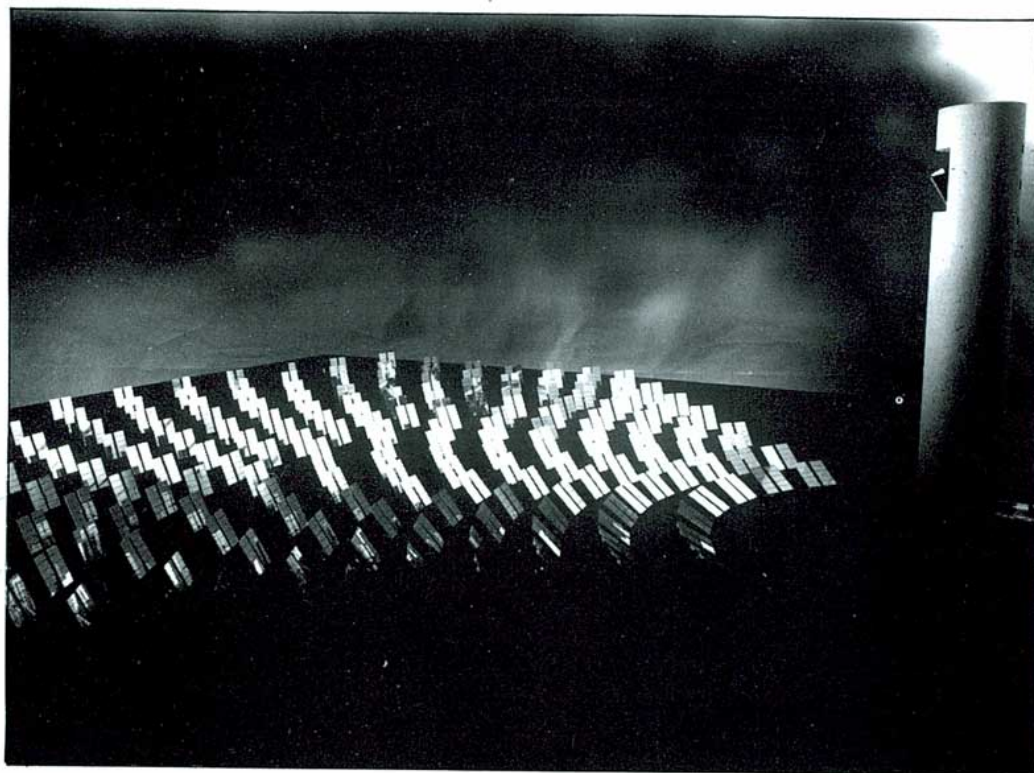
“
*Los objetivos
de coste del
Departamento
de Energía
Americano
no se han
cumplido.*”

ción del 6%, (11% en silicio cristalino) y además se degrada inicialmente, según parece por un mecanismo fundamental cuyo origen teórico es desconocido, pero que esta bien caracterizado experimentalmente. En laboratorio antes de degradación el rendimiento máximo es del 11% (frente al 28% en silicio cristalino). En consecuencia esta reducción de rendimiento compensa a duras penas la ventaja de no pagar casi nada por la materia prima.

Otros materiales de capas delgadas se están investigando, aunque con menor énfasis. El diseleniuro de indio y cadmio está dando excelentes resultados y combinado con una célula de silicio amorfo han dado 13% entre las dos. De todos modos en mi opinión la viabilidad de las células de capa delgada para producir electricidad masivamente requeriría rendimientos del 16% en fabricación y este objetivo me parece difícil de alcanzar. Por el contrario creo que la concentración puede ser una vía más realista para alcanzar los objetivos de coste para producción en masa de electricidad, en particular en climas apropiados.

Hay unanimidad en entender que en climas soleados la concentración tiene un porvenir semejante al del Si-a (en peores climas la presencia de luz difusa reduce su interés). Sin embargo los altísimos rendimientos alcanzados en Stanford indican que el porvenir de esta tecnología es superior a las previsiones. Sin embargo para el desarrollo de la misma creo que hay que subir el nivel de concentración usado hoy en casi dos órdenes de magnitud, y usar células solares fabricadas con las tecnologías y los precios de los circuitos integrados VLSI.

El problema es que las células actuales no pueden operar a tan alta concentración. En particular la de Stanford tiene límites funda-



“
Hoy se tienen
los recursos
tecnológicos
para una
electrificación
de poblaciones
dispersas.”

mentales que la hacen ineficaz más allá de 200 soles (y nosotros propugnamos concentraciones de 2000) pero células de nueva estructura o de nuevos materiales pueden operar a estas concentraciones elevadas y nosotros hemos ideado ya algunas estructuras capaces de hacerlo.

El uso de la óptica anidóptica permite también fabricar concentradores para operar a estas altas concentraciones sin aumentos significativos de coste con respecto a los hoy usados. Por todo esto nuestra ambición futura es promover una amplia cooperación internacional para el desarrollo de estas ideas. No está claro si consiguiéramos los fondos españoles necesarios con la actual estructura de nuestro sistema científico, ni si contaríamos con el necesario apoyo político de nuestras autoridades en medios internacionales.

CONCLUSIONES

Después de diez años de intensa investigación en

energía solar hoy se tienen los recursos tecnológicos para una electrificación de poblaciones dispersas de enorme interés en el tercer mundo.

Sin embargo no se han conseguido los objetivos de coste propuestos en EE.UU. al principio, (y frecuentemente tachados de muy optimistas). Por el contrario los resultados técnicos más esperanzadores, a mi juicio, son los altísimos rendimientos obtenidos con silicio en concentración muy superiores a los pronosticados en su día. Esto indica que esta vía puede arrojar nuevos avances que la hagan muy prometedora sobre todo si se empiezan a obtener resultados semejantes con semiconductores tipo AsGa, cuyo potencial es teóricamente mayor.

En base al éxito comercial de los japoneses incorporando las células de silicio amorfo a equipos de consumo, esta tecnología esta recibiendo un apoyo financiero muy fuerte en todo el mundo.