

ARTÍCULO

## **ENERGÍA, ENERGÍA FOTOVOLTAICA Y CELDAS SOLARES DE ALTA EFICIENCIA**

*Dr. Luis Manuel Hernández García*  
*Profesor Titular de la Universidad de La Habana*



## RESUMEN

Variados y profundos son los problemas actuales que afronta la Humanidad, pero la solución del problema energético es vital para el futuro del planeta, por lo que constituye uno de los temas prioritarios de la Ciencia. La energía es, al mismo tiempo, una solución y un problema para el desarrollo sostenible. Hace posible el progreso y, sin embargo, es una de las principales causas de contaminación del hábitat al originar perjuicios para la salud humana y el medio ambiente.

El consumo energético actual es insostenible para nuestro planeta, tanto por el agotamiento de los recursos naturales como por los daños irreversibles que ocasiona al ecosistema. Para lograr el desarrollo sostenible de la Humanidad es imprescindible crear una educación energética que permita, sin derroche, continuar usando los combustibles fósiles para el desarrollo de nuevas tecnologías energéticas más eficientes y en armonía con el medio ambiente. El uso de las energías renovables es un camino para alcanzar un progreso en lo económico, ecológico y de justicia social. La energía fotovoltaica desempeña un papel de suma importancia en esta estrategia.

Palabras clave: celdas solares tandem, celdas solares cuánticas, energía, energía fotovoltaica, medio ambiente

## ABSTRACT

Among the contemporary dilemmas that the Humanity confronts, the solution of the energy problem is vital for the future of the Planet. Energy is, at the same time, a solution and a trouble for the sustainable development. The energy makes possible the progress and, however, it is one of the main habitat pollution sources, originating damages for the environment and the human health.

Today, energy consumption is unsustainable for our planet, so much by the depletion of the natural resources as by the irreversible damages to the ecology. To encourage an energy education is essential to achieve the sustainable Humanity growth. This will allow - without waste- to use the fossil fuels for the development of new energy technologies, more efficient and in harmony with the environment. The renewable energy sources constitute a road for accomplishing improvements in the economy, the ecology and the social justice. In this approach, the photovoltaic energy plays a quite importance role.

Keywords: tandem solar cells, quantum solar cells, energy, photovoltaic energy, environment

## **Introducción**

Variados y profundos son los problemas actuales que afronta la Humanidad, en cuyas soluciones la educación juega un papel trascendente en la enseñanza de valores que contribuyan a mejorar la convivencia humana en el plano tecnológico, ecológico y social. El problema energético es uno de ellos, porque es vital para el futuro del planeta, por lo que constituye uno de los temas prioritarios de la Ciencia y con mucha más razón de la Física. La energía es, al mismo tiempo, una solución y un problema para el desarrollo sostenible. Hace posible el avance y, sin embargo, es una de las principales causas de contaminación del hábitat al originar perjuicios para la salud humana y el medio ambiente.

El devenir energético mundial es capital por su incidencia en la mayoría de nuestros principales problemas. Nuestras economías utilizan combustibles que, además de no ser renovables, ocasionan daños al entorno en que habitamos. Los actuales sistemas energéticos están alterando el clima global con la emisión a la atmósfera de enormes cantidades de carbón, más de una tonelada anual por habitante del planeta. Una educación energética aceptable desde el punto de vista ambiental conlleva la formación de hábitos que garanticen una sociedad viable. Son muy pocos los otros sectores de la vida donde sea tan esencial asumir una estrategia que permita la creación de un mundo próspero y sano. La misma comunidad científica ha aceptado que el futuro desarrollo tiene que ir unido al desarrollo de nuevas fuentes energéticas que favorezcan el mejoramiento de la calidad de vida.

Desarrollo tecnológico y bienestar social implican mayor consumo energético, por lo que resulta obvio preguntarnos, ¿en qué sentido evolucionará esta relación? La respuesta resulta trivial. El consumo cada vez creciente de energía no podrá ser satisfecho por las llamadas fuentes tradicionales basadas en los combustibles fósiles: carbón, gas y petróleo, por lo que éstas deberán ser sustituidas paulatinamente por otras fuentes, que a su vez sean renovables [1].

Las fuentes renovables de energía son aquellas que, administradas de modo adecuado, pueden explotarse ilimitadamente, es decir, la cantidad disponible no disminuye a medida que se aprovecha. Para tener una política de desarrollo sostenido es indispensable que la mayoría de los recursos, particularmente la energía, sean del tipo renovable.

De todas las fuentes renovables, la energía solar es la única que puede ser aprovechada en todo el planeta, independientemente del clima o la geografía, sin detrimento al ambiente y –teóricamente– con la capacidad de satisfacer las necesidades energéticas de la población mundial. Las celdas solares son dispositivos capaces de transformar directamente la energía solar en energía eléctrica, llamada comúnmente energía fotovoltaica.

El objetivo de todas las fuentes renovables, y la fotovoltaica no es la excepción, es generar energía eléctrica a bajos costos que permitan competir con la producción de energía eléctrica que se obtiene de combustibles fósiles y nucleares. Fabricar celdas solares con alta eficiencia de conversión es uno de los propósitos fundamentales en aras de disminuir el precio del kWh de energía eléctrica.

En el presente trabajo se analizará el problema de la educación energética, propiciando la creación de paradigmas que impidan el uso indiscriminado de los combustibles fósiles como fuente de energía, al tiempo de invocar a la necesidad del uso de la energía solar y más específicamente el empleo de celdas solares fotovoltaicas de alta eficiencia para poder lograr un desarrollo sostenible.

## El consumo de combustibles fósiles

Durante años hemos venido escuchando que el petróleo, y los demás combustibles fósiles, se agotarán, pero continuamos con su explotación creciente como si tal sentencia fuera infundada. Muchos reportan cifras diversas de reservas probadas de combustibles fósiles, sin embargo es generalmente aceptado que se tienen reservas de alrededor de  $1 \times 10^{12}$  barriles de petróleo,  $1 \times 10^{12}$  toneladas métricas de carbón,  $150 \times 10^{12} \text{ m}^3$  de gas y  $3 \times 10^6$  toneladas métricas de uranio [2]. Los mercados internacionales de combustibles fósiles están atentos a las cifras de reservas, especialmente las probadas, definidas como combustibles fósiles que pueden recuperarse a partir de depósitos conocidos bajo las condiciones económicas y operativas actuales, y que han sido identificados por medio del análisis de información geológica y de ingeniería. Las reservas probadas se pueden clasificar como desarrolladas y no desarrolladas. El consumo promedio anual de petróleo constituye aproximadamente el 3% de la reserva probada. Muchos especialistas han diseñado modelos para determinar cuándo ocurrirá el "pico del petróleo", es decir, el año en que la producción de petróleo será máxima y después comenzará a declinar. Varios modelos coinciden como fecha probable del "pico del petróleo" alrededor de los años 2006-2007.

Por otra parte, el consumo anual de gas es equivalente al 1.6% de las reservas y la generación nuclear de electricidad agota por año el 2% de las reservas de uranio. Noticias de reservas probadas de combustibles fósiles son continuamente reportadas, pero no están en ponderación con la explotación y el consumo. En lo que todos los científicos coinciden es que las reservas de combustibles fósiles deben permitirnos crear nuevas fuentes energéticas, al tiempo que con el desarrollo de nuevas tecnologías se tiene que producir energía de manera mucho más eficiente.

Las grandes reservas de combustibles fósiles se encuentran en países de escasos y mediano desarrollo tecnológico. El hecho de poseer petróleo, gas o carbón no es condición suficiente para lograr un desarrollo económico equilibrado en un país específico. Se requiere de una buena tecnología y de una estrategia energética adecuada, adoleciendo los países más pobres de ambas.

La energía es consumida fundamentalmente por cinco grandes sectores: la industria, el transporte, la agricultura, los servicios públicos y comercio, y el residencial.

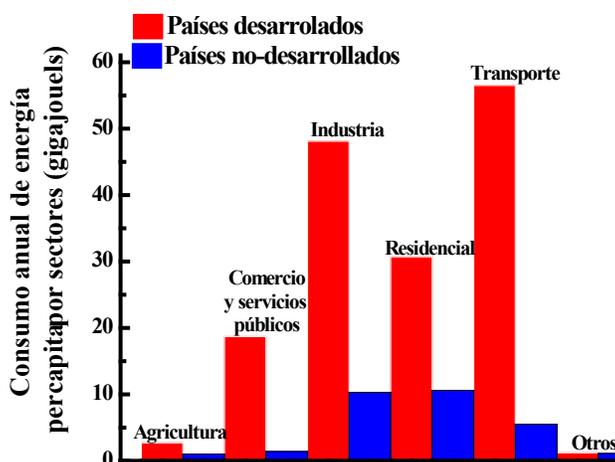


Figura 1. Consumo anual de energía per cápita por sectores en los países desarrollados y no desarrollados

La figura 1 muestra la distribución del consumo anual per cápita para los diferentes sectores de países desarrollados y no desarrollados [2].

Lo primero que resalta en los datos de la figura es la gran disparidad que existe entre el consumo anual de energía per cápita de los países desarrollados y los no desarrollados. El consumo de energía en los países industrializados es entre 3 y 14 veces el consumo de los países no desarrollados, dependiendo del sector. En promedio cada persona en los países desarrollados consume el equivalente de 40 barriles de petróleo (o 220 gigajoules) al año, mientras que en los países no desarrollados el consumo equivale a 6 barriles de petróleo, el 15%. Más aún, en los países de mayor pobreza, el 10% de la población mundial, es decir, más de 600 millones de habitantes, no alcanzan el barril anual. Tal extrema desigualdad tiene efectos muy nocivos en la salud del planeta.

Los datos también indican la gran dependencia de la producción de energía en los combustibles fósiles. Este panorama debe cambiar fuertemente en los próximos años, con la invención de nuevos materiales y tecnologías para desarrollar fuentes no convencionales de energía. El sector industrial es alto consumidor de energía debido a la gran inercia que existe al cambio de tecnologías e infraestructuras que conllevarían a un incremento de las inversiones de capital, aunque el gran temer radica en la disminución de las ganancias para los propietarios. Otro aspecto que resalta en la figura 1 es la disparidad en el uso de energía per cápita en el transporte, que es el sector de mayor consumo en los países industrializados.

Los países más desarrollados poseen una gran infraestructura en carreteras que los hacen más competitivos y a la vez más consumidores de petróleo. La solución a futuro no está en disminuir la cantidad de automotores, sino en que ellos puedan consumir energías no provenientes de combustibles fósiles, en particular del petróleo, el cual debe reservarse fundamentalmente para desarrollar nuevas fuentes energéticas.

La Humanidad se presenta al reto de: ¿existen suficientes recursos para acabar con la pobreza, alcanzar un desarrollo social y económico significativo para la mayor parte de la población mundial, proteger el medio ambiente y conservar al mismo tiempo las comodidades y ventajas que ha aportado la tecnología moderna? Para responder afirmativamente esta pregunta, se necesita en primerísimo lugar un cambio radical de los paradigmas de consumo, en donde la educación ha de jugar un papel predominante. También es necesario llevar a cabo políticas promotoras de investigación y desarrollo que permitan el progreso de nuevas tecnologías más eficientes en el consumo de la energía. Otro aspecto muy importante es la inversión de capitales, en particular, en una primera etapa, de las nuevas fuentes renovables de energía que deben sustituir a los combustibles fósiles. ¿Es utópica la posibilidad de un sistema energético basado en fuentes renovables? Por supuesto que no, más aún, es imprescindible esa transición para la supervivencia de la Humanidad. Ese tránsito ha comenzado pero debe intensificarse su ritmo y para ello son necesarios financiamientos que provengan fundamentalmente de los países desarrollados, imponiendo, por ejemplo, impuestos a las transnacionales de la energía y a las corporaciones militares.

Las transiciones de las fuentes energéticas ya han ocurrido en otras etapas, la leña y el carbón vegetal que durante milenios se utilizaron como portadores energéticos fueron sustituidos por la hulla entre 1750 y 1830; después la hulla fue sustituida por el petróleo a finales del siglo XIX. La situación actual es más complicada porque la población mundial en el siglo XX se incrementó en ¡6 veces!, una tasa de crecimiento nunca antes alcanzada e hizo que los habitantes en el planeta sobrepasaran la cifra de 6000 millones. Por lo tanto ahora se necesita mucho más energía para satisfacer las necesidades de la población mundial.

Lo expuesto hasta aquí hace evidente que uno de los grandes temas de la Ciencia lo constituye la energía y uno de sus objetivos centrales será encontrar fuentes alternativas. La solución del problema energético presupone además que las nuevas fuentes sean compatibles con el medio ambiente y permitan un desarrollo sostenible para la humanidad. Entre las propuestas de las nuevas fuentes de energías, el Sol ocupa un lugar de extraordinaria importancia, por lo que se refiere a la cantidad de energía que recibimos de él, así como a las posibilidades concretas de aplicaciones directas e indirectas de la tecnología solar: calentamiento de agua, destilación, secado de

productos agrícolas, cocina, refrigeración y climatización, iluminación, conversión en energía eléctrica y biomasa. Todas estas tecnologías tienen una incidencia directa en cualquier país que reciba una adecuada radiación solar promedio anual, y muy en especial en los países en vías de desarrollo, generalmente situados en zonas geográficas de alta insolación.

### **Energía fotovoltaica**

La radiación solar incidente sobre la Tierra es equivalente a más de 800 000 millones de GWh de energía en un año lo que representa alrededor de 35000 veces el consumo mundial en ese tiempo, y es 500 veces mayor que el equivalente energético suministrado por todas las demás fuentes de energía. La energía solar que recibe cada año la península Arábiga, zona geográfica donde radican las mayores reservas de petróleo, es el doble del equivalente energético de las reservas mundiales de petróleo. La superficie de la Tierra recibe en 30 minutos una cantidad de energía solar equivalente al consumo energético mundial en un año.

La energía fotovoltaica es el proceso de convertir directamente la energía proveniente del Sol en electricidad mediante el uso de las celdas solares. La energía fotovoltaica, comparada con el resto de las fuentes renovables de energía, tiene entre sus ventajas más importantes:

- su conversión es la más instantánea de todas
- es modular y aditiva, es decir, puede generar desde valores de potencia menores del watt hasta decenas de MW
- no tiene partes móviles y el costo de mantenimiento es el más bajo de todos
- es una tecnología madura y aceptada internacionalmente
- es una tecnología que permite generar empleos y un desarrollo industrial sustentable
- es altamente confiable al ser el Sol una fuente de energía limpia, inagotable y de acceso libre
- es la mejor opción en fuentes renovables de energía para introducir en un ambiente urbano
- es fácil de producir e instalar a escala masiva
- es el modo más accesible de proveer de energía a los miles de millones de personas sin electricidad en el mundo

Entre los problemas actuales para el desarrollo de la energía fotovoltaica a escala tecnológica se pueden mencionar: a) por tratarse de una tecnología relativamente nueva no existe la suficiente cultura y conocimientos respecto a su capacidad y utilización; b) el costo inicial de la instalación es alto si se compara con sus similares; c) las instalaciones no son fáciles de obtener de manera comercial y a gran escala. Sin embargo, el problema fundamental radica en que, a diferencia de los combustibles fósiles, su uso en el transporte es actualmente complicado.

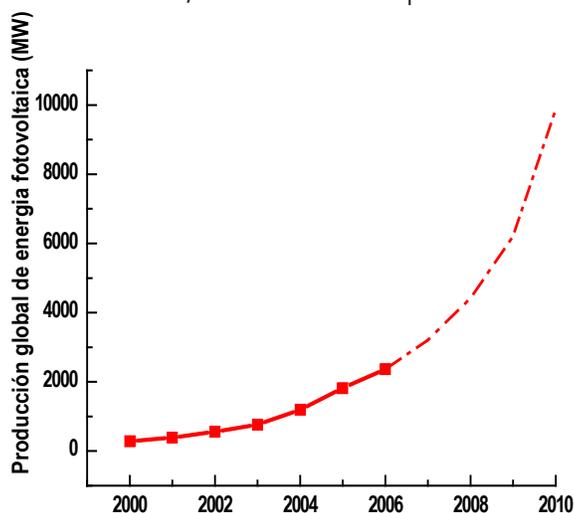


Figura 2. Producción global fotovoltaica

Un reflejo del incremento de la industria fotovoltaica se muestra en la figura 2. En el 2006, la producción mundial de potencia fotovoltaica alcanzó 2368 MW que comparada con la del 2000 representa un incremento del 823%. La producción de energía fotovoltaica a través de la fabricación de paneles solares aumentó exponencialmente durante los últimos quince años y se espera que continúe con esa tendencia hasta el 2010. Japón es el país líder y Alemania es el país que está a la vanguardia en la Unión Europea. Ambos países han basado su crecimiento en un adecuado balance de los programas de investigación y desarrollo, asociados a una acertada política fiscal que incentiva el uso de energías provenientes de fuentes renovables.

Una desventaja importante que debe resolver la energía fotovoltaica es su costo. A finales de la década pasada se decía que la energía fotovoltaica se convertiría competitiva cuando el kW-h de energía eléctrica descendiera del umbral de US \$ 0.10, pero en la actualidad con el aumento desmedido del precio del barril de petróleo es imposible anunciar un pronóstico. En la actualidad, el precio del kW-h fotovoltaico es de 6 a 10 veces superior al precio del kW-h producido por medios convencionales, sin embargo, con el incremento de los volúmenes de producción de la energía fotovoltaica se reducen de manera importante los costos. La construcción de plantas de 10-20 MW de energía fotovoltaica que se están fabricando y conectando a la red, también hace disminuir los costos. A este punto, es importante resaltar la descentralización que se logra en la entrega de la energía a través de las instalaciones fotovoltaicas. Un gran aporte de la tecnología reciente ha sido la telefonía que ha desechado los cables de cobre para la transmisión telefónica, alcanzando la distribución de las comunicaciones a nivel personal, ¿por qué entonces no soñar que la energía podrá transitar por el mismo camino?

Otra alternativa importante es la disminución de los costos de producción del silicio, material con el que se producen casi el 90% de las celdas solares con la que se fabrican los paneles. Obtener silicio grado solar barato y abundante es el principal objetivo para la disminución del precio del kW-h fotovoltaico.

El incremento en la energía de conversión de las celdas solares es otro camino para disminuir los costos. La figura 3 muestra el pronóstico del precio del watt fotovoltaico (no con el barril costando \$100 dólares) que puede obtenerse como función de la eficiencia y del costo por área del material con que se producen las celdas solares [3]. Tres diferentes grupos de celdas solares destacan: el grupo I, constituido por las celdas solares en base a Si volumétrico mono y policristalino, con eficiencias cercanas al 20% y costos del material del orden de \$350 dólares, permite alcanzar precios del watt fotovoltaico por debajo de los \$3.50 dólares. Las celdas solares fabricadas en base a películas delgadas - designadas como grupo II - poseen un costo menor por área, al utilizar menos material, y aunque poseen una eficiencia menor que las del grupo I, el costo del watt fotovoltaico puede llegar a disminuir hasta 1 dólar. Las prometedoras celdas de alta eficiencia constituyen el grupo III, con las cuales se esperan costos de alrededor de 0.20 dólares por watt fotovoltaico. En la actualidad, varias son las instituciones encargadas en desarrollar celdas solares de alta eficiencia, destacándose el proyecto de la Universidad de Delaware para obtener eficiencias de conversión del 50% [4].

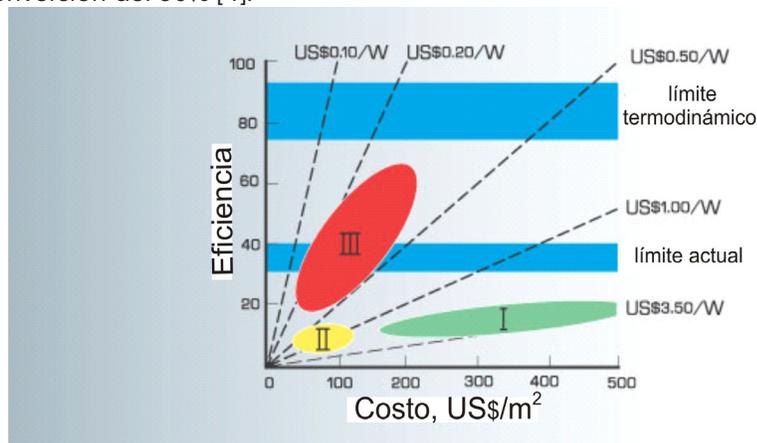


Figura 3. Pronóstico del precio del watt fotovoltaico como función de la eficiencia y del costo del material, para tres grupos diferentes de celdas solares: I, Si mono y policristalino volumétrico; II: láminas delgadas y III de alta eficiencia.

Diversas son las variantes utilizadas para aumentar la eficiencia de conversión de una celda solar y sortear los mecanismos de pérdidas que aparecen en los dispositivos fotovoltaicos de homounión. La figura 4 muestra los dos mecanismos de pérdidas más importantes en este tipo de celdas solares: la imposibilidad de absorber los fotones con energías menores que la banda prohibida del semiconductor y la termalización de los portadores creados con energías superiores a la banda prohibida. Estos dos mecanismos son los responsables de que prácticamente el 50% de la radiación solar no se convierta en energía eléctrica a través de una celda solar. A continuación se presentará con algún detalle sólo dos de estas aproximaciones a dispositivos fotovoltaicos de alta eficiencia: las celdas tandem y las celdas cuánticas.

### Celdas solares tandem

Las celdas tandem son dispositivos fotovoltaicos que trabajan absorbiendo una gran parte de radiación del espectro solar. Para ello utilizan más de una celda solar, de manera que la radiación solar con menor longitud de onda (con fotones más energéticos), es absorbida por la celda cuyo semiconductor posee el mayor ancho de la banda prohibida. Por otro lado, la radiación a mayores longitudes de onda es absorbida por las restantes celdas semiconductoras que poseen un ancho de banda menor. Para alcanzar este

**espejos sensibles a diferentes partes del espectro solar**

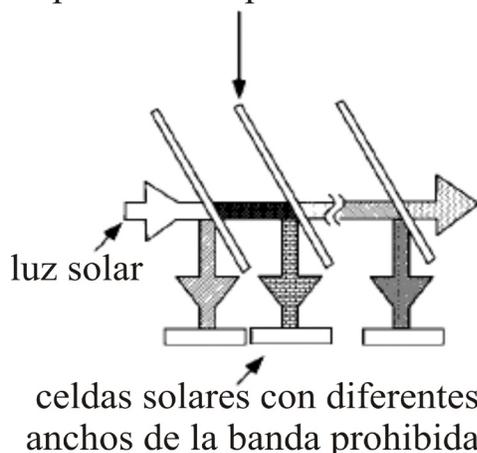


Figura 5. Celdas tandem con separación espectral mediante espejos.

celda solar con mayor ancho de la banda prohibida es la primera que absorbe la radiación solar, reteniendo los fotones más energéticos y a continuación se colocan las restantes celdas de manera que su ancho energético vaya decreciendo y absorban las radiaciones remanentes.

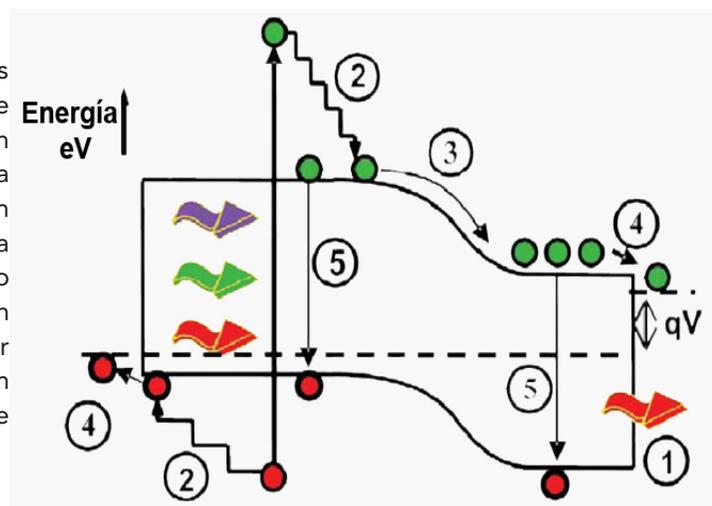


Figura 4. Los procesos de pérdidas en una celda solar de homounión: 1) fotones con energías menores que la banda prohibida del semiconductor; 2) pérdidas por termalización de la red; 3) y 4) pérdidas a través de la unión y los contactos; 5) pérdidas por recombinación

objetivo se emplean generalmente dos procedimientos. En el primero, por medios ópticos, como se ilustra en la figura 5, diferentes espejos separan las componentes espectrales de la radiación solar y las reflejan a las celdas respectivas, es decir, la radiación con menores longitudes de onda es absorbida por la celda solar con mayor ancho de la banda prohibida y de la forma antes descrita se absorben las restantes radiaciones. En el otro procedimiento, mostrado esquemáticamente en la figura 6, la

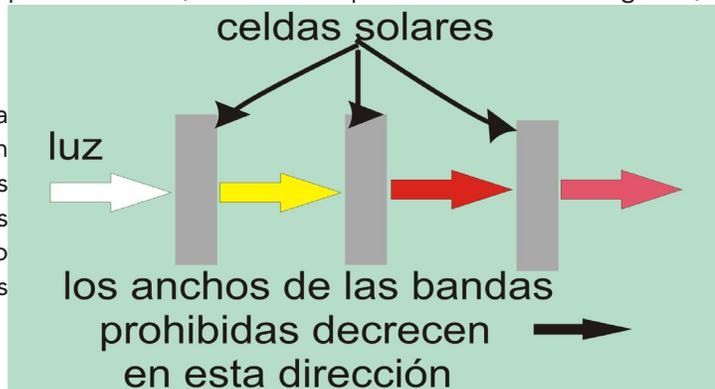


Figura 6 Celdas tandem en la configuración de disminución de los anchos de bandas de los semiconductores

También se ha hecho un arreglo de dispositivos fotovoltaicos para fabricar celdas tandem monolíticamente, también llamadas celdas con estructura de cascada, en donde se depositan varias capas para formar uniones p-n conectadas en series. En la figura 7 se muestra una celda tandem en cascada la cual posee tres celdas solares, la de mayor ancho de banda prohibida, InGaP, se encuentra en la parte superior absorbiendo los fotones de mayor energía; a continuación aparece la celda en base a InGaAs con menor ancho de banda prohibida. Finalmente viene la celda de Ge que posee el menor valor de banda prohibida, de manera que prácticamente absorbe toda la radiación solar. También aparecen diodos túneles, que son uniones p-n con alta concentración de impurezas, los cuales garantizan que la corriente que circula a través de toda la celda tandem es la misma para cada una de las celdas particulares, que es un requisito indispensable para el funcionamiento de este tipo de celdas. La capa colchón realiza la misma función que en las celdas de  $\text{p-Al}_x\text{G}_{1-x}\text{As}/\text{p-GaAs}/\text{n-GaAs}$ .

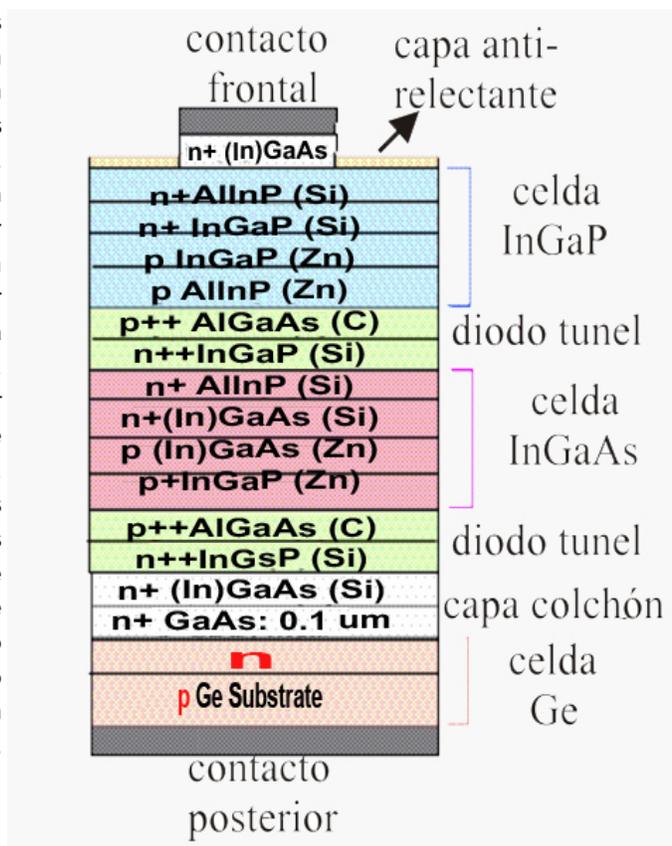


Figura 7. Celda tandem InGaP/InGaAs/Ge

En la figura 8 se muestra cómo contribuye cada una de las celdas individuales, InGaP, AlGaAs y Ge, a la ampliación espectral de la eficiencia cuántica de la celda tandem. Obsérvese que la de mayor ancho de banda prohibida, InGaP tiene su respuesta desplazada hacia la radiación con menores longitudes de onda en tanto las celdas de AlGaAs y Ge que poseen menores anchos de banda prohibida tienen sus respuestas a mayores longitudes de onda. Esta ampliación de la respuesta espectral produce una mayor corriente de cortocircuito como se observa en la curva característica I-V que se presenta en la figura 9.

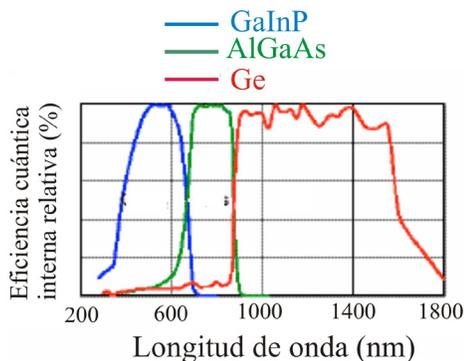


Figura 8. Respuesta espectral de la celda tandem

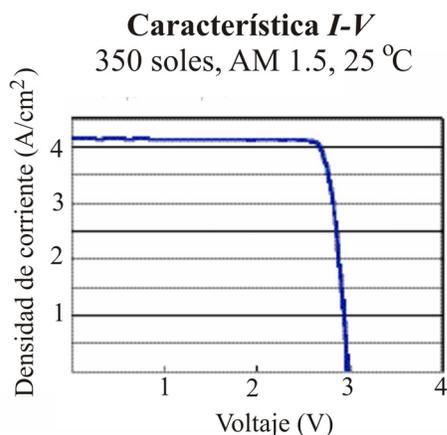


Figura 9. Característica volt-ampérica de la celda tandem

### Celdas solares cuánticas

El objetivo de las celdas solares cuánticas es aumentar el número de fotones absorbidos a longitudes de onda más cortas, de forma análoga a una celda tandem con dos uniones p-n, pero con la gran diferencia de la simplificación en su fabricación. Estas celdas poseen capas nanométricas donde los efectos de confinamiento cuántico extienden la absorción de fotones a longitudes de onda más cortas y se fabricaron por primera vez en el Imperial College de Londres, en los inicios de la última década del pasado siglo, por el profesor K. W. Barmham.

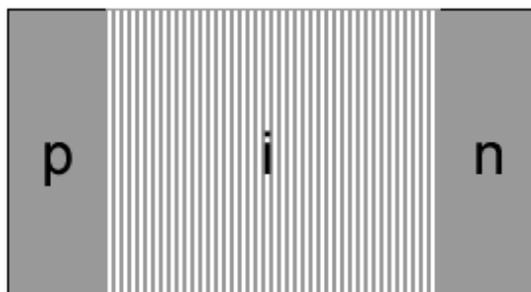


Figura 10. Esquema de una celda solar p-i-n con pozos cuánticos múltiples (franja blanca) dentro de su región intrínseca.

Las celdas cuánticas se fabrican en una estructura p-i-n, esto es, una unión p-n con una zona de material no impurificado o intrínseco entre la región de huecos y electrones. Esto permite tener una zona de carga espacial amplia en donde la existencia del campo eléctrico interno hace que los portadores generados en esta región sean inmediatamente separados. En la región intrínseca se depositan películas nanométricas de un material con un ancho de banda prohibida menor que la del material de la celda y cuyo espesor varía entre 1 nm y 10 nm. La explicación de la absorción de los fotones en estas capas, se da a partir de la teoría cuántica y por ello a estas capas nanométricas se les denominan pozos cuánticos. En la figura 10 se ilustra una celda solar con pozos cuánticos múltiples en la región intrínseca.

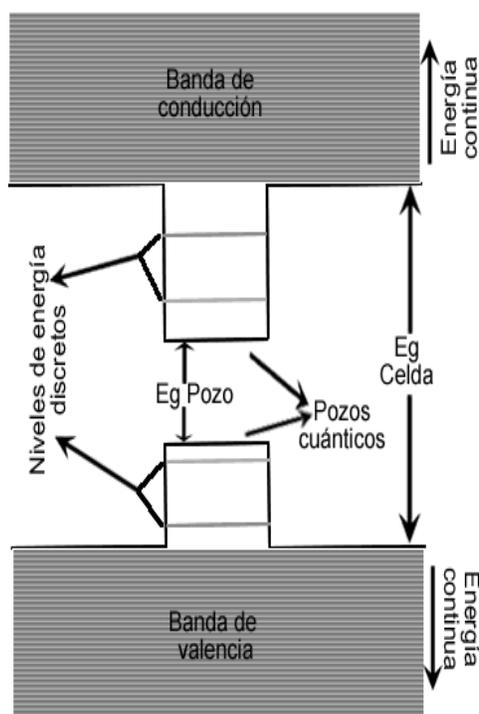


Figura 11. Esquema de bandas de un pozo cuántico en un semiconductor,  $E_{gCelda}$  es la energía de la banda prohibida del semiconductor de la celda donde se introducen las películas de ancho energético  $E_{gPozo}$ , siendo  $E_{gPozo} < E_{gCelda}$ .

Los pozos cuánticos introducidos en la zona intrínseca poseen niveles discretos de energía entre sus bandas de valencia y conducción y cuya diferencia en energía es inferior al ancho de banda prohibida del semiconductor de la celda p i n. En la figura 11 se muestra el diagrama de bandas del pozo cuántico dentro del material base de la celda p i n. De esta manera la celda puede absorber radiación solar a mayores longitudes de onda. Al aumentar la absorción de luz en las longitudes de ondas cortas la eficiencia cuántica de la celda mejora y con ello la corriente de cortocircuito. El efecto de la absorción mediante los pozos cuánticos queda evidenciado en la figura 12[5], donde pueden observarse las contribuciones de las tres regiones, las impurificadas y la intrínseca.

Al utilizar una estructura con pozos cuánticos múltiples en una celda solar p i n, se obtiene la ventaja de poder absorber regiones del espectro solar con energías menores, lográndose una mayor corriente de cortocircuito con respecto a la celda sin pozos. Desafortunadamente, hay una disminución en el voltaje a circuito abierto ya que existe un incremento de la recombinación con respecto a la celda sin pozos, debido a que no todos los portadores creados por la luz pueden escapar de los pozos cuánticos. Existen por tanto nuevos parámetros a optimizar: la profundidad, ancho y número de pozos.

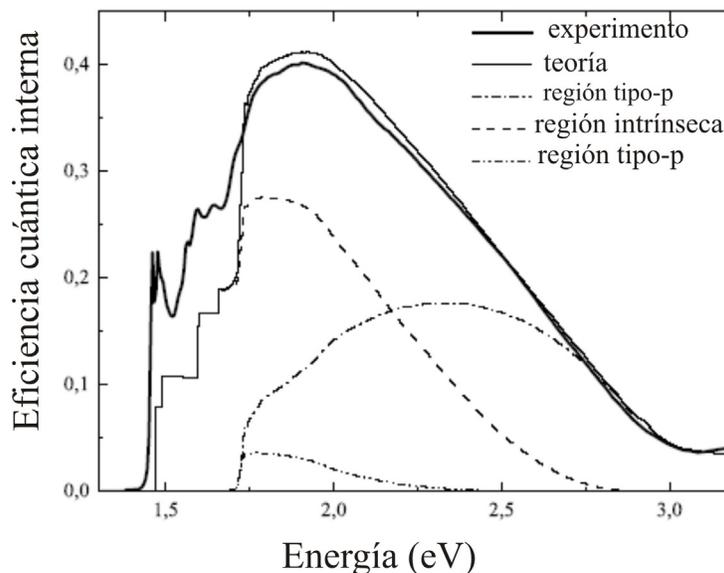


Figura 12. Eficiencia cuántica interna de una celda solar con pozos cuánticos múltiples

Dentro de las celdas solares cuánticas también se están desarrollando dispositivos fotovoltaicos basados en puntos cuánticos que pueden crear sub-bandas dentro de la banda prohibida, formándose un sistema de tres bandas, permitiendo aprovechar la radiación solar de mayores longitudes de onda.

## Conclusiones

Resumiendo, se puede enfatizar que el problema energético es esencial para el desarrollo de la Humanidad, y encontrar nuevas tecnologías más eficientes y fuentes renovables en armonía con el medio ambiente constituye un fin de la ciencia. Las energías renovables establecen la forma para que el mundo pueda crecer en el aspecto ecológico, económico, cultural y de justicia social utilizando estrategias basadas en una colaboración correcta y solidaria tanto en el campo de la investigación como en el campo de la realización industrial. La energía fotovoltaica es parte importante en esta estrategia y las celdas solares de alta eficiencia muestran un camino para abaratar los costos de la energía eléctrica.

## **Bibliografía**

- [1] L. Hernández. El problema energético en el desarrollo global y la energía fotovoltaica. *Revista Iberoamericana de Física*, 2, 1, 2006
- [2] J. Chow, R. J. Cop, P. R. Portney. Energy resources and global development. *Science*, 302, 1528, 2003.
- [3] M. Green. Third generation photovoltaics: solar cells for 2020 and beyond. *Physica E*, 14, 65, 2002.
- [4] A. Barnett, C. Honsberg, D. Kirkpatrick, S. Kurtz, D. Moore, D. Salzman, R. Schwartz, J. Gray, S. Bowden, K. Goossen, M. Haney, D. Aiken, M. Wanlass, K. Emery. 50% efficient solar cell architectures and designs. *Proceedings of the 32nd IEEE PVSC*, 2006, pp. 2560-4
- [5] J. C. Rimada, L. Hernández, J. P. Connolly, K. W. J. Barnham. Conversion efficiency enhancement of AlGaAs quantum well solar cell. *Microelectronics Journal*. 38, 513, 2007