

## POSIBILIDADES DE LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA COMO FUENTE PRIMARIA EN EL FUTURO

*Juan A. López Villanueva*  
*Catedrático en el área de conocimiento "electrónica"*  
*de la Universidad de Granada*

### 1. EL SOL COMO FUENTE DE ENERGÍA

Podemos afirmar que nos encontramos en uno de los momentos históricos de mayor interés para la energía solar. El reciente encarecimiento del petróleo, el incremento de la demanda energética por parte de los países en proceso de industrialización y los graves problemas medioambientales que parecen surgir por un exceso de combustión de los llamados combustibles fósiles (carbón y petróleo), han convertido el desarrollo de las denominadas energías renovables, entre las que ocupa un lugar destacado la energía solar fotovoltaica, en uno de nuestros objetivos prioritarios. Dentro de la sección de la revista *Contraluz* dedicada a temas de ciencia, analizamos en este número las posibilidades de esta tecnología para convertirse en una de las fuentes principales de energía, al menos a medio o largo plazo, en regiones con alta incidencia de radiación como es el sur de España.

Antes de describir las características principales de los sistemas fotovoltaicos, conviene introducir algunos comentarios sobre la energía solar:

Prácticamente la totalidad de la energía disponible por el hombre procede directa o indirectamente del Sol. Este astro no sólo es el centro de nuestro sistema planetario sino que, además, irradia una ingente cantidad de energía en todas las direcciones, parte de la cual incide sobre los diferentes planetas. A la Tierra llega continuamente energía procedente del Sol con una potencia de más de cien billones de kilovatios. Esta potencia es equivalente a la que generarían unos doscientos millones de centrales nucleares de tamaño medio distribuidas por toda la Tierra, operando de forma continuada.

Una de las principales fuentes energéticas en las que se fija la radiación solar para su posterior uso es la almacenada en la materia orgánica. La energía solar es utilizada en el

crecimiento de las plantas a partir de componentes básicos como el agua, el dióxido de carbono y algunos nutrientes, mediante el proceso de la fotosíntesis. De esta manera, la energía solar absorbida se almacena en ellas en forma de energía química. Cuando quemamos madera en la chimenea, esa energía química se transforma en calor, devolviéndonos así la que previamente se había tomado del Sol. A la materia orgánica utilizada para la generación de energía se le llama "biomasa". Puesto que la materia orgánica es también el origen del petróleo, podemos afirmar que la energía química disponible en los combustibles fósiles procede igualmente de la radiación solar incidente sobre la Tierra, fijada y almacenada durante millones de años.

Además de la energía de los combustibles fósiles y de la biomasa, el Sol también nos proporciona otras fuentes alternativas. La evaporación de grandes masas de agua que pasan de los mares a la atmósfera, formando las nubes, transforma la energía solar en energía potencial gravitatoria que puede ser devuelta al caer las gotas de lluvia y al fluir las corrientes de los ríos, y puede ser convertida a su vez en energía eléctrica en las centrales hidroeléctricas. El calentamiento de la atmósfera, o más propiamente las diferencias de presión y de temperatura, producen el desplazamiento de masas de aire dando lugar a la llamada energía eólica, que también se aprovecha para la generación de electricidad.

Hemos comentado distintas fuentes energéticas que tienen un origen solar, al menos indirecto. No obstante, cuando hablamos de energía solar, normalmente nos referimos a las que aprovechan el recurso solar de forma directa, es decir, a la energía solar térmica, que utiliza la radiación solar para producir calor, o a la fotovoltaica que transforma directamente la radiación solar en electricidad.

Si bien todas las fuentes mencionadas almacenan o aprovechan la radiación solar, una diferencia importante entre las basadas en los combustibles fósiles y las demás es la "sostenibilidad". Incluso la combustión de la biomasa se puede considerar una fuente energética sostenible, ya que, aunque emite dióxido de carbono a la atmósfera, contribuyendo así al tan comentado efecto invernadero, ese mismo dióxido de carbono ha sido retirado de la atmósfera durante el crecimiento de la materia que se está quemando, y el balance neto en un periodo de tiempo de uno o varios años queda compensado. Sin embargo, el caso de los combustibles fósiles, principal fuente de la energía que se consume en la actualidad, es muy diferente. Se cree que la mayor parte del petróleo existente se generó durante el periodo terciario, esto es, desde hace unos sesenta y cinco millones de años hasta hace unos dos millones y medio de años. El carbono fijado durante miles o millones de años en esos hidrocarburos está siendo devuelto a la atmósfera de forma prácticamente instantánea en la escala de tiempos geológica. Aunque existen pruebas de algunas aplicaciones del petróleo desde la antigüedad, se puede afirmar que su extracción y uso de forma masiva comenzó en los Estados Unidos de América a partir de 1859; esto es, estamos consumiendo petróleo desde hace menos de doscientos años y ya hemos agotado una buena parte de las reservas registradas.

El consumo energético mundial es aproximadamente de unos 13 teravatios (un teravatio equivale a mil millones de kilovatios). Teniendo en cuenta el crecimiento esperado de la población mundial y el desarrollo industrial de países muy poblados como China y la India, estudios del Departamento de Energía de los Estados Unidos de América estiman que este consumo puede crecer a unos 30 teravatios para el 2050, y a unos 46 teravatios para finales de siglo. Es obvio que ese enorme incremento no va a poder seguir sustentándose por el petróleo y los demás combustibles fósiles. Si ya son problemáticas las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera con el nivel de consumo actual, ¿qué va a ocurrir cuando lo doblemos antes de mediados de siglo, o lo tripliquemos un poco más adelante, suponiendo que no se agoten las reservas antes de esas fechas?.

Esta brutal emisión de dióxido de carbono, así como de otros gases aún más nocivos, de forma masiva a la atmósfera, está produciendo nefastas consecuencias, de las cuales, afortunadamente, están adquiriendo conciencia no sólo los individuos sino también los gobiernos. Una posible solución a este problema es el despliegue de los sistemas de conversión directa de energía solar, bien térmica o fotovoltaica, si se consiguen superar los inconvenientes tecnológicos o económicos planteados. Hemos de tener en cuenta que, incluso con el consumo estimado para finales de siglo, la energía solar que incide sobre la Tierra (120000 Teravatios) será 2600 veces superior a la demandada, por lo que la solución solar no es inviable, aunque para ello tuviéramos que utilizar el 1,32% de la superficie cubierta por tierra firme, o el 0,38% de la superficie terrestre total si se incluye la cubierta por los océanos, suponiendo una eficiencia de conversión (la relación entre la energía útil que se produce y la que se recibe del Sol) del 10%.

## **2. LA RADIACIÓN SOLAR EN LA PROVINCIA DE JAÉN**

Andalucía, con una latitud comprendida entre 36° y 39°, es una región rica en recurso solar. Cabra del Santo Cristo se encuentra a una latitud de 37° 42', muy próxima a la de Jaén (latitud 37° 44'). En la figura 1 se muestra la energía por metro cuadrado y segundo (vatios por metro cuadrado) recibida en una estación meteorológica instalada en Jaén y gestionada por el grupo de investigación en Modelización de la Atmósfera y Radiación Solar de la Universidad de Jaén, durante los solsticios de invierno y verano de 2006, es decir, durante los días en los que el Sol se encuentra en sus posiciones más baja y más alta, respectivamente. La curva correspondiente al 22 de junio presenta una variación suave, con el máximo al mediodía, mientras que la del 21 de diciembre muestra fluctuaciones que pudieron deberse a la alternancia de claros y nubes. Se puede ver también en la figura que la radiación incidente de pico recibida el 21 de diciembre fue aproximadamente la mitad de la registrada el 22 de junio, y se recibió durante menos tiempo: menos de diez horas en diciembre frente a casi quince horas en junio. Si se promedia a todo el día, incluyendo

también la noche, el resultado es de 97 vatios por metro cuadrado el 21 de diciembre, y de 335 vatios por metro cuadrado el 22 de junio.

La evolución de la radiación media detectada a lo largo de todo el año 2006, tomada de la misma fuente, se representa en la figura 2 también en vatios por metro cuadrado. Aunque la radiación de pico medida durante los meses de verano se aproxima a un kilovatio por metro cuadrado, al promediar a todo el día (24 horas) se reduce a algo menos de la tercera parte.

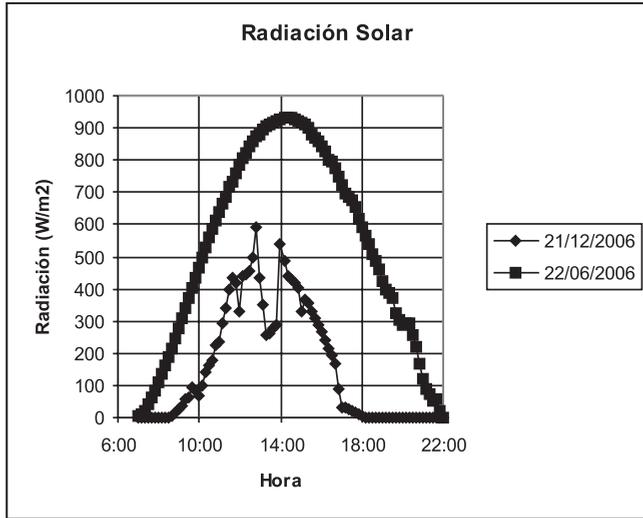


Figura 1: Radiación solar por metro cuadrado en Jaén durante los dos solsticios del año 2006.

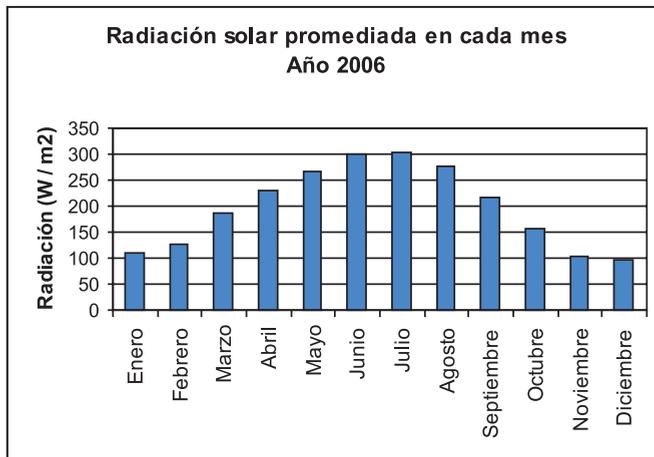


Figura 2: Radiación solar por metro cuadrado en Jaén en el año 2006, promediada en cada mes.

Si se promedia la radiación incidente a todo el año, se obtiene el valor de 198 vatios por metro cuadrado. Por lo tanto, si disponemos de un sistema de conversión que opera con una eficiencia del 10%, obtendríamos una potencia media útil de unos 20 vatios por metro cuadrado. La energía media correspondiente es de algo más de 14 kilovatios-hora (KWh) en un mes por cada metro cuadrado de superficie de colector solar.

### **3. LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA**

Los sistemas solares fotovoltaicos transforman la energía solar directamente en energía eléctrica. Los elementos base de tales sistemas, en los que se produce la conversión energética, son las células solares. Las células solares se combinan y agrupan en módulos formando paneles de uno o varios metros cuadrados de superficie.

Existen células solares de distintos tipos, pero prácticamente todas ellas obedecen al mismo esquema básico, representado de forma simplificada en la figura 3. Esencialmente, una célula solar consiste en dos electrodos de materiales de distinto tipo y una capa intermedia de absorción de la radiación solar. Los materiales de contacto han de satisfacer una condición fundamental: las partículas cargadas móviles que van a conducir la corriente eléctrica (electrones) han de tener una energía media en uno de los electrodos superior a la del otro.

La luz solar está formada por corpúsculos o cuantos de energía, llamados fotones. En ella se superponen fotones de distintas energías correspondientes a los diferentes colores que, como sabemos, se separan en el arco iris. Por ejemplo, dentro de la luz visible, los fotones correspondientes a la luz roja tienen menos energía que los de la luz azul. Pero en la radiación solar existen también fotones no visibles de menores energías que los de la luz roja, llamados infrarrojos, y fotones también invisibles de energía superior a los de la luz azul y violeta, que componen la radiación ultravioleta.

Cuando los fotones son absorbidos en la capa central de la célula solar, su energía es ganada por los electrones que pasan a niveles más energéticos y se desplazan internamente en la célula hacia el electrodo de mayor energía media. Se puede decir que la luz solar actúa como una bomba de energía en el interior de la célula. Los electrones pasan entonces del electrodo de mayor energía media al de menor a través del circuito externo dando lugar a una corriente eléctrica que puede realizar un trabajo o, por ejemplo, cargar una batería donde queda almacenada la energía eléctrica para su posterior consumo. (Figura 3).

Las células solares más utilizadas en la actualidad son de silicio, el mismo material utilizado en la fabricación de los microcircuitos electrónicos. Los dos electrodos se consiguen impurificando el silicio con fósforo y boro, respectivamente, y están unidos internamente, actuando también como capa de absorción. Pero no todos los fotones solares pueden ser absorbidos en el silicio. Existe un valor umbral mínimo de energía de manera que, si los fotones no lo alcanzan, los electrones no encuentran estados electrónicos permitidos en el silicio y no pueden ser bombeados.

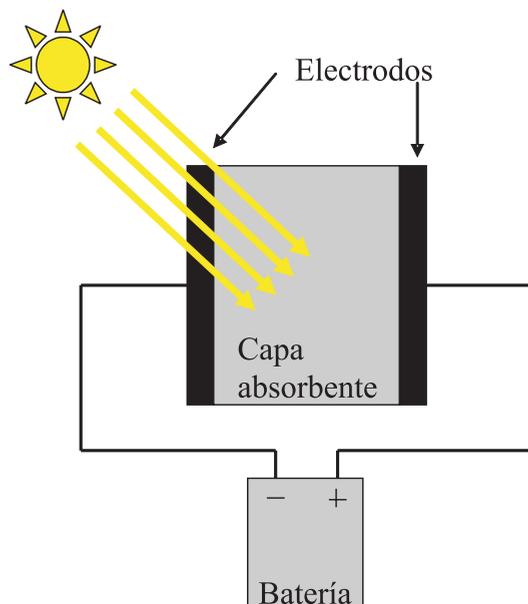


Figura 3: Esquema simplificado de una célula solar conectada a una batería como elemento de carga.

En la figura 4 se representa la distribución de la radiación solar que llega a la superficie de la Tierra (en la gráfica con línea delgada). Las distintas longitudes de onda corresponden a los distintos “colores”, de manera que los fotones con mayor longitud de onda tienen menor energía, y viceversa. Se observan longitudes de onda en la región infrarroja para las cuales se produce un fuerte descenso de la radiación, como consecuencia de la absorción por la atmósfera. También se representa en la figura 4 (en línea gruesa) la máxima radiación que podría aprovechar una célula solar de silicio.

Se puede ver en la figura la existencia del umbral mínimo de energía que hemos mencionado, situado en la región infrarroja, de manera que si la longitud de onda es mayor (la energía es menor), la luz no puede producir corriente eléctrica. Pero observamos, además, que tampoco se puede aprovechar toda la energía correspondiente a la luz visible y ultravioleta. Esto se debe a que cada fotón sólo puede bombear a un electrón, por más que su energía supere al umbral. Por tanto, la energía extra que adquieren los electrones la pierden calentando a la célula mientras avanzan hacia los electrodos, de manera que ese exceso de energía es igualmente inútil para la generación de corriente eléctrica. Ésta es una de las causas principales de que la eficiencia de conversión sea relativamente pequeña.

Debido al efecto anterior, y a diversos factores de pérdidas, la eficiencia práctica en los paneles fotovoltaicos comerciales no es muy superior al 10%. Los fabricantes especifican la potencia de los paneles en vatios de pico, esto es, suponiendo que la radiación solar

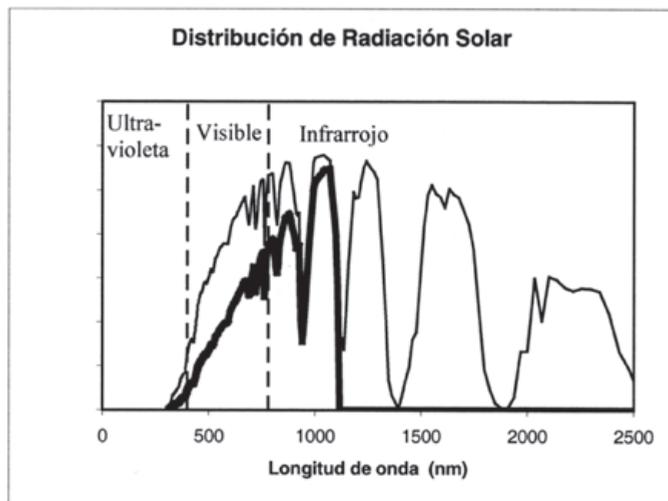


Figura 4: Distribución de la radiación solar en función de la longitud de onda (línea delgada) y parte máxima de esa distribución que podría ser aprovechada por una célula solar de silicio en el mejor de los casos (línea gruesa). Se han marcado con líneas a trazos los límites de separación entre las regiones infrarroja, visible y ultravioleta.

incidente es de 1000 vatios por metro cuadrado y que los terminales de salida del panel están conectados a una carga óptima. Sin embargo, como la potencia incidente media a lo largo de un año es de unos 200 vatios por metro cuadrado, como hemos visto anteriormente en este artículo, un panel típico de 100 vatios realmente proporcionará una potencia media de 20 vatios a lo largo del año. Suponiendo una vida útil de veinte años, ese panel habrá suministrado una energía de unos 3500 KWh (20 vatios x 20 años x 365 días x 24 horas). Estimaciones más conservadoras fijan la energía producida en unos 2000 KWh, para hacer un análisis de costes, de manera que si el coste del panel instalado con todos sus accesorios fuera de unos 500 €, el coste final de cada KWh sería de unos 25 céntimos. Si tenemos en cuenta que el precio actual de la electricidad es de 8,75 céntimos por cada KWh, o bien de unos 12 céntimos por KWh añadiendo la parte proporcional de línea, alquiler de equipos e impuestos para un consumo medio mensual de 250 KWh (no destinado a calefacción), el coste del kilowatio-hora fotovoltaico resulta demasiado caro aún. Es imperiosa, pues, una reducción de costes en los sistemas fotovoltaicos.

Otro de los problemas planteados es el del almacenamiento de energía. Hasta ahora hemos usado datos medios, pero en la figura 1 pudimos ver cómo varía la radiación a lo largo de un día, y en la figura 2 observamos cómo lo hace la media mensual a lo largo de un año. Es obvio que el Sol no nos proporciona la energía justo en el instante en el que la necesitamos y es necesario el uso de baterías de capacidad adecuada para poder disponer en las horas nocturnas de la energía almacenada durante el día. El almacenamiento entre estaciones es más complicado, y puede obligar a sobredimensionar los sistemas para el

correcto abastecimiento durante el invierno, a menos que dispusiéramos de un sistema de almacenamiento a largo plazo. Se está postulando para ello el uso del hidrógeno: la energía solar se utilizaría para descomponer el agua en oxígeno e hidrógeno de manera que ese hidrógeno quedara disponible como combustible para generar electricidad mediante pilas de combustible en el momento en que se requiriera. Sin embargo, estos sistemas se encuentran aún en una etapa temprana de desarrollo.

Para conseguir el abaratamiento de los paneles fotovoltaicos también son necesarios mayores esfuerzos. Existen células en fase de investigación basadas en polímeros o materiales orgánicos con posibilidades de resultar mucho más baratas que las de silicio, aunque por el momento están resultando con mucha menor eficiencia y problemas de estabilidad. No obstante, puede que la solución a corto plazo se encuentre más bien en las células de alta eficiencia utilizadas hasta ahora en aplicaciones espaciales. En los paneles actuales, prácticamente el 60% del coste se debe a las células fotovoltaicas mientras que el 40% restante se debe a los elementos adicionales: estructura de soporte, instalación, cableado, terreno y sistemas electrónicos de acondicionamiento. Quiere esto decir que, aunque redujéramos a cero el coste de las células solares, no podríamos disminuir el coste del sistema a más de un 40% del actual. El uso de células con el doble o triple de eficiencia sí permitiría reducciones adicionales de costes, ya que proporcionan la misma potencia con la mitad o tercera parte de la superficie, y por tanto con la mitad o tercera parte de los costes de los elementos adicionales. Un ejemplo de este tipo de células utiliza capas de diferentes materiales con distintos umbrales de la energía de absorción: la luz atravesaría primero la

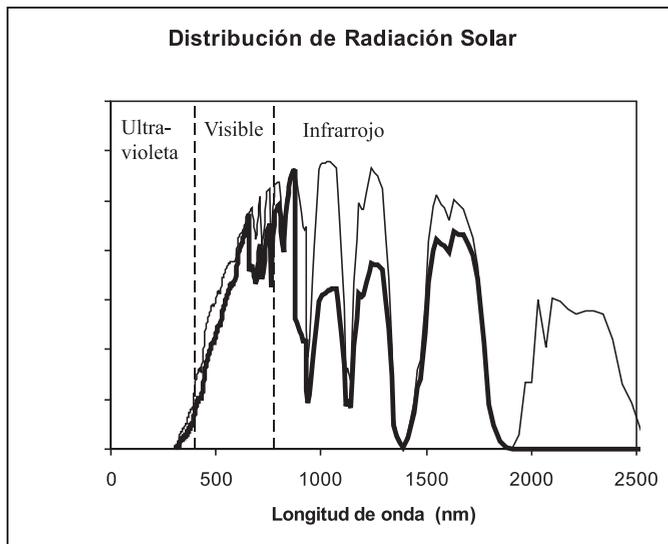


Figura 5: Distribución de la radiación solar en función de la longitud de onda (línea delgada) y parte máxima de esa distribución que podría ser aprovechada por una célula solar de tres materiales con umbrales de absorción escalonados, en el mejor de los casos (línea gruesa).

capa de mayor umbral, absorbiéndose los fotones de mayor energía mientras que los de energías inferiores a ese umbral la atraviesan sin absorción. Se encuentran entonces con un material de menor umbral, en el que se absorbe otra parte de los fotones restantes, y así sucesivamente. Se consigue de esa manera un mejor aprovechamiento de la distribución de la radiación solar.

En la figura 5 se representa el aprovechamiento máximo que se podría conseguir con una célula típica de tres materiales con tres umbrales diferentes. El material de mayor umbral aprovecha mejor la energía en las regiones visible y ultravioleta, y el de menor umbral aprovecha mejor la región infrarroja. Estas células requieren una tecnología mucho más compleja y costosa, pero se pueden hacer rentables con el uso de lentes concentradoras, de manera que la superficie efectiva de la célula sea muy inferior al área de la lente, que es la expuesta al sol. Esta tecnología se encuentra aún en fase experimental, aunque existen ya parques solares basados en ella operando en diversos lugares del mundo.

#### **4. CONCLUSIONES**

Podríamos concluir que la tecnología solar fotovoltaica supone una solución potencial, al menos parcial, para satisfacer la gran demanda energética esperada en el futuro si se resuelven sus dos problemas principales: el almacenamiento de la energía generada y los altos costes. Mientras no se consigan reducir los costes de los sistemas fotovoltaicos, no parece que puedan competir con los convencionales, basados en los combustibles fósiles. Mientras tanto, y para impulsar su desarrollo, la Administración ha establecido distintos tipos de subvenciones o incentivos. Sin embargo, para poder establecer una comparación justa de costes, también sería necesario computar los acarreados a la Administración para mitigar los efectos nocivos del consumo masivo de derivados del petróleo tanto en la salud como en el medio ambiente, o en el tratamiento de los residuos nucleares.

En cualquier caso, dada la gran demanda de energía esperada a lo largo de este siglo, parece claro que el petróleo no puede continuar siendo la fuente primaria, principalmente por los problemas medioambientales que acarrea su consumo masivo. Es de desear que se produzca un gran despliegue de las energías renovables, ya que, si esto no ocurre, y dado que no es previsible que estemos dispuestos a reducir nuestro consumo y, a veces, derroche energético, no parece quedar más opción que la energía nuclear. Las centrales nucleares comenzaron a estar fuertemente cuestionadas a partir del trágico accidente de Chernobil en 1986, y su crecimiento se deceleró fuertemente. A principios de los 90 del siglo pasado operaban en el mundo unas quinientas centrales nucleares con una potencia total de 247 gigavatios (un gigavatio es un millón de kilovatios), que producían el 15% de la electricidad mundial. Si tuviéramos que pasar de los 13 teravatios demandados actualmente a los 30 teravatios esperados para el 2050 mediante centrales nucleares, habría que instalar unas 17000 centrales de 1 gigavatio por todo el planeta en los próximos cuarenta años. Parece claro que ésta no es la solución deseable, suponiendo que fuera posible, por lo que la tecnología solar, que es la única alternativa capaz de proporcionar energía a gran escala, se ha situado en el centro de nuestras esperanzas.