



Volver a las fuentes

Cómo obtener energía barata que nos permita reemplazar a los combustibles fósiles para, al menos, mantener la producción actual de bienes y servicios e, idealmente, aumentarla es el gran desafío que plantea en este artículo Miguel Adrián Tichno, miembro externo del Grupo de Geofísica Aplicada del Departamento de Física de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires.

Las joyas de la abuela

Durante milenios el hombre satisfizo sus necesidades energéticas directamente a partir de la energía entregada por el sol. Los aproximadamente mil watts por metro cuadrado que el sol entrega en un día sobre la superficie de la tierra son los responsables directos de la formación del viento a través de cambios de temperatura, de la circulación del agua producida en los ríos a través del ciclo de evaporación y lluvias, del crecimiento de los árboles que se utilizan como leña y de los organismos en general que, a través de las eras, se han transformado en los combustibles fósiles existentes hoy en día. En este sentido, el petróleo y el carbón son combustibles que le deben su existencia a la energía del sol.

Así es, exceptuando los casos específicos de la energía nuclear, la geotérmica y la mareomotriz, todas las otras formas de energía de las que hoy disponemos son de un modo u otro debidas a la acción del sol.

Hasta la Revolución Industrial, el hombre consumió mayormente recursos energéticos cuya renovación estaba asegurada durante una vida humana, tanto en el caso de la leña, como en el del viento y el agua, aprovechados en los molinos aun cuando su uso no se hacía en forma sustentable (por ejemplo, no se reponían los bosques). A partir de ese momento, con la invención de la máquina a vapor, las necesidades energéticas de la sociedad dieron un salto importante. Entonces, la industria no consumía energía a partir de los músculos de los operarios sino que, cada vez más, los reemplazó por máquinas para los trabajos más pesados, que éstas realizaron en forma más eficiente.

Para responder a ese salto en el consumo se utilizaron combustibles fósiles de gran capacidad energética, abundantes y muy baratos, ya que en su precio sólo se introdujo el valor de su extracción y preparación final antes del consumo, pero no el de su fabricación a partir de materia prima orgánica del que, a su propio ritmo, se encargó la naturaleza. Este último hecho es una maravilla para cualquier industria y se comparte en todas las industrias extractivas en mayor o menor grado.

La mala noticia es que cuando la tasa de formación de un producto es menor que la tasa de su consumo, en algún momento este producto se agota, y sus precios de formación de alguna manera se verán reflejados en el tiempo. En otras palabras, hace unos cientos de años que vendemos las joyas de la abuela.

El gran salto adelante

Sin embargo, los grandes saltos tecnológicos que ha dado la humanidad se asocian a una multiplicación en las necesidades energéticas de la sociedad. Esto se ve de manera sencilla hoy en día: por ejemplo, el consumo de combustibles líquidos de un automóvil es mucho menor que el de hace cincuenta años atrás, pero la cantidad de vehículos en circulación es muchísimo mayor. Luego se introducen tecnologías que consumen más y más energía y reemplazan el trabajo manual, tanto en el hogar como en la industria, desde lavadoras eléctricas hasta computadoras, pasando por válvulas controladas eléctricamente a distancia y ascensores para llevar a obreros a los pisos superiores de una obra en construcción.



Miguel Adrián Tichno

¿Cómo obtener energía barata que nos permita reemplazar a los combustibles fósiles para, al menos, mantener la producción actual de bienes y servicios e, idealmente, aumentarla?

Esto es algo que las naciones industrializadas se preguntan hace rato y actúan en consecuencia, sus respuestas a esta pregunta moldean el mundo futuro delante de nuestras narices.

En la actualidad, en el mundo existe todo un conjunto de propuestas alternativas a utilizarse como fuentes de energía: algunas más caras, otras más baratas, unas renovables, otras no tanto, unas antiguas, otras novedosas, pero existe una conciencia general que el cambio a energías alternativas es inevitable a mediano plazo, lo que resultará seguramente en energía más cara, al menos hasta que se alcance la economía de escala y se construya la infraestructura básica para utilizarla de manera eficiente.

No voy a detenerme aquí a analizar la conveniencia o no de cada una de ellas, el análisis sería demasiado extenso y no es la intención del presente artículo. Basta mencionar que dadas las características físicas de nuestro país, tenemos la oportunidad de poner en práctica a la mayoría de ellas, desde las tradicionales hidroeléctrica y nuclear, a las más novedosas, basadas en combustibles líquidos como el hidrógeno, o las más antiguas pero renovadas, basadas en la fuerza del viento y en la biomasa.

Uno de los ejemplos de fuentes de energía alternativas más mencionadas, y que a mi criterio reúne varias de las características más importantes que se deben buscar en una fuente alternativa de energía, es la recolección de energía solar a través de celdas fotovoltaicas.

Así es, el sol –la fuente de energía por antonomasia– es gratis; a todos los efectos prácticos, inagotable, y tiene una densidad de energía razonablemente abundante en contraposición con las fuentes que requieren extracción de materiales escasos, como por ejemplo, la nuclear.

Por otro lado, el material con que se fabrican las celdas fotovoltaicas es el segundo en abundancia en nuestro planeta, es decir, que si se consigue una adecuada escala económica es razonable pensar que su costo pueda disminuir mucho.

Desde un punto de vista ecológico, es una de las alternativas más razonables de las que hoy se conocen junto con la

energía eólica y tiene mayor eficiencia en el balance energético que la biomasa (con la cual hay que tener mucho cuidado por que, a menos que sea material de descarte, su balance energético suele ser negativo).

Por último, requiere de una tecnología importante pero no inaccesible para un país como el nuestro, a través de un desarrollo propio (al contrario de lo que promete la energía de fusión, si algún día deja de ser un sueño tecnológico elusivo), con lo que nos permitiría tener todo el ciclo de combustible dentro del país, con las ventajas de soberanía que eso acarrea.

Por lo tanto, este tipo de fuente energética nos permitiría dar un gran salto adelante.

Cosechando energía del sol

El sol envía al espacio ingentes cantidades de energía en forma de radiación electromagnética, ya sea en las longitudes de onda largas correspondientes a radiofrecuencias, como al infrarrojo, el visible y las más pequeñas del ultravioleta. Esta energía la llevan unas partículas conocidas como fotones, cada uno de los cuales transporta una cierta cantidad fija de energía que depende de su longitud de onda.

A medida que la tierra viaja por el espacio en su órbita, absorbe parte de todos estos fotones que son los que aprovechan los distintos organismos para poder realizar sus funciones vitales.

Si se pudiese transformar la energía que llevan estos fotones en energía eléctrica o en energía calórica, se la podría aprovechar en forma directa.

La energía calórica obtenida directamente del sol se utiliza hace rato; por ejemplo, en la forma de invernaderos para plantas o para derretir cera de abejas. En los últimos tiempos se han construido centrales solares de producción de energía que utilizan espejos para concentrar la radiación solar en un punto donde se calienta agua que se utili-

za en un generador de vapor convencional. Sin embargo, este método tiene una muy baja eficiencia de recolección (menor al 5%) y, por lo tanto, requiere de ingentes cantidades de terreno para funcionar. Esto es así porque el mecanismo de transformación es bastante ineficiente, dado que utiliza unas pocas longitudes de onda de las que emite el sol en calentar el agua (el solo hecho de que el agua sea transparente dice que la energía que traen los fotones visibles no se absorbe y tampoco se utiliza para calentar el agua).

Una solución mucho más eficiente para la recolección de la energía del sol es la que se consigue con las celdas fotovoltaicas. Éstas se utilizan desde hace tiempo en lugares como las calculadoras o en los satélites espaciales, se fabrican con materiales llamados semiconductores y su función es transformar la energía que traen los fotones de luz en energía eléctrica.

Los semiconductores son la base de la electrónica moderna y su primer gran avance se dio en la década de 1950, cuando un grupo de físicos en los Bell Laboratories –que incluía al famoso John Bardeen, uno de los pocos científicos que obtuvieron dos veces el Premio Nobel– se dieron cuenta de que cuando a algunos materiales no conductores de la corriente eléctrica –como por ejemplo, el germanio o el silicio– se les agregaban pequeñas cantidades de impurezas de materiales similares a ellos, pero con un electrón de más o de menos, se podía controlar cuanta corriente eléctrica circulaba por ellos. Así fabricaron el primer transistor con semiconductores.

Ahondaremos un poco más en esto. Según la mecánica cuántica, cuando se tiene un átomo cualquiera, los electrones en este átomo tienen energías fijas y se encuentran ubicados en “nubes” alrededor del átomo llamadas orbitales.

Si bien puede haber en un mismo orbital más de un electrón, si dos electrones tienen distinta energía se ubican en distintos orbitales, por eso los físicos hablan de estos orbitales como niveles de energía permitidos. Los electrones en

un átomo tratan siempre de llenar primero los orbitales más cercanos al núcleo, que son los de menor energía. Cuando de alguna manera se entrega energía suficiente a un electrón, éste puede pasar a un nivel de energía superior en el cual estará un tiempo para finalmente caer de nuevo en el nivel inferior, al emitir un fotón de luz con una energía igual a la diferencia entre los dos niveles. Esto se ve en las calcomanías que brillan en la oscuridad cuando se apaga la luz, porque con la luz normal se excitan los electrones de los átomos de un material que se agrega al plástico de las calcomanías y, como el tiempo en que tardan en decaer es grande y los fotones que emiten para compensar la energía perdida tienen una longitud de onda en el visible, las vemos brillar a simple vista.

Con un sólido cristalino –es decir, con sus átomos regularmente colocados–, lo que ocurre es un poco distinto: los niveles de energía de los átomos que constituyen el sólido se superponen y se mezclan, en especial, los niveles permitidos de energía superiores (los más alejados del núcleo del átomo). Estos niveles se transforman en rangos de energía que pueden tener los electrones del sólido, que se conocen como bandas de energía.

Ahora los electrones de la banda superior se comparten en toda la estructura y tienen energías que pueden variar dentro de las permitidas en esa banda. Los que están en bandas inferiores –es decir, más cerca del núcleo de cada átomo– no se pueden mover a otro átomo; de hecho, para ver el comportamiento de un material dado sólo interesan las dos bandas superiores conocidas como bandas de valencia y de conducción.

Ningún electrón puede tener una energía fuera de las de esas bandas, es decir, entre las bandas hay zonas prohibidas en energía. Desde el punto de vista de movilidad dentro del sólido cristalino, cuantos más electrones existan en una banda dada, menos movilidad entre átomos habrá, ya que un electrón se mueve de un átomo a otro en una forma parecida al juego de la silla: sólo se puede mover a la zona

de influencia de otro átomo si este tiene la “silla” de energía correspondiente desocupada (esto se llama principio de exclusión de Pauli).

Así se diferencian los materiales como conductores y no conductores. Los conductores son los materiales que tienen la banda de valencia semivacía; mientras que los aisladores son los que tienen la banda de valencia llena. Si se quiere empujar un poco a los electrones para que se muevan de un lado a otro –al poner una pequeña diferencia de voltaje entre dos extremos del material– se tendrá en cuenta que, para los conductores, la banda de valencia es una autopista donde pueden ir a toda velocidad; mientras que en los aisladores, la banda de valencia está atestada, casi no se mueven, a menos que se entregue la suficiente energía a los electrones en la banda de valencia para que pasen a la siguiente banda, que está completamente vacía y es la de conducción.

Ahora bien, la energía que debe entregarse en general es alta, pero hay algunos materiales que tienen una diferencia de energía entre las bandas de valencia y de conducción relativamente pequeña, que se denominan semiconductores.

Si en estos semiconductores cada tanto se reemplaza un átomo del material base por un átomo de un material que tenga un electrón más (o con un electrón menos, que es equivalente a decir por un “agujero” más), en esas zonas alrededor del átomo extraño, la banda de conducción se modifica y quedan unos pocos electrones más (o huecos más) que ahora están listos como para conducir.

El gran truco descubierto por Bell Laboratories consiste en que si un material es semiconductor y en una mitad se colocan átomos de un material con electrones de más y, en la otra mitad, se ubican átomos con electrones de menos, justo en el medio se obtendrá un salto entre las energías permitidas de las bandas con un electrón menos y con un electrón más; es decir, existe una diferencia de voltaje permanente que, si varía en forma externa, si se coloca una pila y de acuerdo a cómo se la coloque, se logrará que el elemento

semiconductor conduzca o no. Se controla la cantidad de corriente que se deja pasar para un lado y para el otro.

¿Qué tiene que ver todo esto con las celdas fotovoltaicas? Mucho, como se verá a continuación. Una de las cosas que sucede cuando un fotón incide sobre una superficie es que si la energía del mismo es justo la necesaria, hace que se desprenda un electrón de un átomo. Esto quiere decir que, un semiconductor en el cual incide un fotón, es capaz de hacer pasar un electrón de la capa de valencia a la de conducción. Como en esa capa de conducción tenemos una juntura pn (la unión entre las partes negativa y positiva artificiales que se lograron antes) y existe una diferencia de voltaje permanente, este electrón se moverá en el sentido permitido por el gradiente artificial de la unión antes de que encuentre alguna silla en la banda de valencia y quiera caer en la misma. Entonces, este electrón de más se puede usar para cargar una batería y, *voilà*, se obtiene la energía del sol lista para usarse.

Los fotones incidentes gastan la energía justa que existe entre las diferencias de energía de estos dos niveles, los que tienen menor energía no son absorbidos y los que tienen mayor energía sólo se aprovechan en parte. Lo bueno de esto es que, si bien existe un rango de fotones que no se usan, al comparar el método con los de espejos para calentamiento, éste es mucho más eficiente, aunque el hecho de que no se absorba toda la energía de los fotones incidentes fija, entonces, una eficiencia teórica máxima en cada material posible, que es de alrededor de un 28% para el silicio.

Las celdas solares típicas se construyen de silicio, que tiene varias calidades: la más cara y más eficiente es la de silicio monocristalino; es decir, cuando cada una de las unidades de recolección están conformadas por un solo cristal, todos sus átomos ordenados en una sola red. Teóricamente (en laboratorio), con estas celdas se puede llegar a eficiencias de recolección de energía del orden del 24% de la energía incidente. En realidad, cuando se las lleva al campo, donde tienen que hacerse concesiones en lo que respecta a su montaje, su eficiencia llega al 17%.

Un segundo tipo de celdas son las que se fabrican con silicio policristalino; es decir, no en un solo cristal como antes sino formadas con varios cristales cuyas orientaciones son distintas entre sí. Éstas tienen eficiencias del orden de 18% en laboratorio y de 14% en el campo. Su ventaja es que son un poco más baratas que las anteriores.

Por último, se utilizan las llamadas de silicio amorfo, que consisten en capas muy delgadas de silicio (menores a un micrómetro) colocadas sobre la superficie de un material amorfo como el vidrio. Son las más baratas, pero sus eficiencias son del orden del 13% en laboratorio y de sólo 7% a 5% en el campo, por lo que se suelen usar en aparatos con poca necesidad de energía como calculadoras o relojes.

Como el costo energético de su construcción es relativamente alto, el repago de las celdas solares se produce en función del costo directo y de su eficiencia en la recolección de energía. Por lo tanto, ese factor es el que normalmente se busca optimizar.

Los valores económicos de kwh que hoy se consiguen generar con celdas solares fotovoltaicas son muy altos respecto de los que se utilizan en general, por lo que se debe mejorar la eficiencia y escala de mercado de las mismas para que sean utilizables como reemplazo de los combustibles fósiles.

Hoy en día existen unas cuantas estrategias para mejorar la eficiencia de las celdas solares. Entre las más interesantes se pueden mencionar:

- **Celdas con conversores de energía.** Los conversores son materiales que permiten que un fotón incidente de una energía dada se transforme en dos fotones de menor energía. Al elegir este material en forma adecuada se puede lograr que los fotones que ingresan al conversor con más del doble de la energía necesaria, la celda fotovoltaica los absorba y se dividan en dos fotones con energía suficiente para que ésta pueda volver a absorberlos. Con este tipo de materiales, se logra un aumento de eficiencia que en el silicio permite llegar hasta 39,6%, contra el 28% teórico sin conversor. Este desarrollo todavía se encuentra en laboratorio.
- **Celdas fabricadas con otros materiales.** Por ejemplo, el arseniuro de galio o el seleniuro de cobre-indio poseen eficiencias del orden de 40%. El problema de estos materiales es su alto costo. Sin embargo, buscar materiales de reemplazo del silicio es un área activa de investigación. Por otra parte, dado que celdas de distintos materiales absorben un rango distinto de fotones, se apilan celdas de materiales distintos para maximizar la eficiencia de recolección total.
- **Concentradores de luz.** Son dispositivos que maximizan la concentración de sol sobre la celda durante el máximo posible de horas de luz.
- **Celdas apiladas y antirreflectivas.** Se utilizan configuraciones de celdas apiladas o piramidales para minimizar la reflexión en sus superficies y absorber la mayor cantidad de fotones posibles.

Ahora que conocemos la forma en que funcionan estas celdas solares, haré unos pocos números, no muy exactos, pero que darán una idea de la magnitud de las cosas expuestas.

Estimaremos las necesidades energéticas totales y actuales en la Argentina en un número del orden de 3 Quad/año (1 Quad = 1015 BTU = 1.06×10^{18} J) y creciendo.

La radiación solar directa media en las latitudes correspondientes a la Argentina es de alrededor de 5,5 Quad/año por cada 1000 km² (este número no debe utilizarse más que para una estimación global).

Si quisiéramos obtener toda nuestra energía de radiación solar (no digo que esto sea razonable sino que sirve para dar una idea de la dimensión del tema expuesto), incluyéramos su utilización para fabricar combustibles líquidos y gaseosos y juntáramos las ineficiencias que corresponden a los mecanismos de extracción mediante celdas fotovoltaicas y los debidos al transporte y transformación, nos encontraremos que se necesitan unos 2000 a 4000 km² para producir 1 Quad/año, así que para lograr nuestro reemplazo total hipotético se necesitarían aproximadamente 6000 a 12.000 km² de terreno destinados sólo a la producción de energía.

A pesar de ser una inmensidad (la superficie de una provincia como Misiones es de 30.000 km², es decir que destinaríamos un tercio de una provincia entera para cosechar energía), no deja de ser menos del 0,25% de la superficie de nuestro territorio.

Sin ir más lejos, en la campaña 2004-2005 se estima que se destinaron más de 60.000 km² para la cosecha de trigo y más de 140.000 km² para la de soja.

Al tener en cuenta que gran parte de los países industrializados cuentan con superficies aprovechables muy pequeñas, el impacto social de este tipo de energías sería mucho más alto para ellos que para nosotros. Si un país como Bélgica quisiera cubrir sus necesidades energéticas actuales con energía solar necesitaría destinar a esto más de un 25% de su territorio.

Conclusiones

La energía abundante y barata es imprescindible para el crecimiento. Nuestro país tiene la suerte de poseer condiciones naturales como para aplicar casi cualquiera de las fuentes de energía alternativas a los combustibles fósiles que se conocen hoy en día. Entre éstas, la energía solar podría ser clave para nuestro futuro, cuanto antes aprendamos de ella y utilicemos nuestros recursos para generar conocimientos y productos basados en la misma, antes podremos beneficiarnos.

Por supuesto que este fin sólo se podrá lograr si, además de comprar tecnología, se generan desarrollos propios, ya que de no dominar todo un ciclo de energía completo estaríamos a merced de precios internacionales y otros se llevarían el beneficio.

Dado que el recambio de fuentes de energía es imprescindible a mediano plazo y su costo económico será alto, creo que es necesario que ya mismo se empiecen a generar alternativas viables de recambio aprovechando que aún disponemos de combustibles fósiles baratos.

Por otra parte, un estudio real y completo de cualquier fuente alternativa de energía debe tener en cuenta todos los costos energéticos de la ecuación, así como los factores ecológicos y sociales que involucran su aplicación.

En el caso de las celdas solares debería tenerse en cuenta el costo energético de construcción de las celdas, el impacto ecológico de su construcción y de las pilas que se requieren para el almacenamiento en las horas de no producción y el

costo ecológico y social de la inmensa superficie que se requiere para su uso en escala.

De nosotros depende que estemos en la cresta de la ola, ya sea con este tipo de tecnologías o con otras similares, pero siempre realizando un análisis real y efectivo de las propiedades y ventajas de cada una, buscando un valor agregado adicional a la energía en sí, a través del desarrollo de tecnología y así, por último, volver a las fuentes, usando las mismas fuentes de energía que usaron nuestros antepasados. ■

Miguel Adrián Tichno es licenciado en Ciencias Físicas de la Universidad de Buenos Aires. Sus principales áreas de experiencia son especificación y selección de herramientas y equipos de tecnologías novedosas; gestión y dirección de proyectos científicos de apoyo a la ingeniería y análisis geofísico. Es especialista en georadar y en métodos de investigación no destructiva eléctricos, electromagnéticos y nucleares. En la actualidad se desempeña como consultor independiente en ciencia y tecnología y es director y redactor de Aplicaciones tecnológicas e industriales de la ciencia, publicación con distribución por e-mail, boletín quincenal de divulgación científica y tecnológica. Es miembro externo del Grupo de Geofísica Aplicada del Departamento de Física de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires. Desde 1997 hasta agosto de 2004 se desempeñó como gerente técnico y comercial en Área Geofísica Eng SA. Además, trabajó en otras importantes empresas como Techint Servicios Urbanos y Tomografía de Hormigón Armado SA. Ejerció la docencia como ayudante de cátedra de Laboratorio de Física Nuclear en 1991 en la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires. Entre 1990 y 1992, fue encargado de instrumental, hardware y software y del desarrollo del Proyecto Tomógrafo Compton en la misma facultad, en el Laboratorio de Ciencias Exactas y Naturales. Además, trabajó en el Centro de Investigaciones Técnicas de las Fuerzas Armadas y en NCR Argentina.