Nicolás Enrique Vázquez-Barragán, Karen Rodríguez-Rosales y Francisco Javier de Moure-Flores

Ventanas fotovoltaicas: el futuro de la energía solar

La energía solar se ha convertido en una alternativa muy atractiva para producir electricidad mediante el uso de celdas solares. En este artículo se describen los materiales que constituyen a un dispositivo solar y cómo el efecto fotovoltaico influye en la generación de corriente eléctrica. Además, se menciona la futura aplicación que tendrá la tecnología fotovoltaica sobre ventanas ordinarias.

Introducción

En la actualidad, la búsqueda por mejorar la calidad de vida ha llevado a crear una sociedad más industrializada, con una gran necesidad tecnológica y, como consecuencia, un aumento sin precedentes en el consumo energético en todo el mundo. Pero, ¿de dónde proviene la energía que se utiliza? Principalmente de fuentes no renovables, como el gas natural, el carbón y el petróleo, las cuales no pueden reaprovecharse una vez utilizadas. Se estima que para el año 2050 estos combustibles fósiles no serán suficientes para satisfacer los requerimientos energéticos del mundo si continúan siendo la base para la producción de energía. Su excesivo y acelerado uso no sólo podría provocar una crisis energética, sino también agravar el calentamiento global. Por lo tanto, es necesario proponer un uso cada vez más extenso de energías alternativas.

Estas fuentes de energía pueden aprovecharse ilimitadamente con la tecnología adecuada, sin riesgo de agotamiento. Dentro de este tipo de energías se encuentran la energía eólica, la solar, la biomasa, la mareomotriz, la geotérmica y la energía del hidrógeno, entre otras. La solar se ha considerado una de las más importantes debido a la gran cantidad de energía que nuestra estrella irradia diariamente sobre la Tierra, 10 000 veces mayor que la que se consume diariamente en todo el planeta, lo cual da una idea del gran potencial que tiene la energía solar para satisfacer las demandas energéticas de la sociedad humana (Arancibia Bulnes y Best y Brown, 2010).

El uso de la energía solar ofrece varias ventajas:

1. Es tan abundante que se considera inagotable.
2. Permite generar electricidad mediante el uso de celdas solares.

3. Sirve para calentar agua y climatizar espacios mediante sistemas térmicos.
4. Hace posible racionalizar el consumo de los combustibles fósiles.

Una de las mejores maneras de aprovechar la energía del sol es mediante el uso de celdas solares, las cuales transforman directamente la luz en electricidad a través del efecto fotovoltaico. Este fenómeno se basa en el uso de materiales semiconductores que, al ser irradiados con luz solar, no sólo generan electricidad, sino también actúan en la degradación de contaminantes y en **procesos termoeléctricos**.

Proceso termoeléctrico
Aquel en que hay una conversión de calor en electricidad mediante materiales semiconductores.

De acuerdo con las últimas cifras de la Agencia Internacional de Energía, en 2023 la generación global de electricidad mediante energía solar fotovoltaica alcanzó los 485 TWh, impulsada por la reducción de costos y el aumento en la eficiencia de las celdas solares. En México, la producción fue de 18 TWh, provenientes principalmente de los parques fotovoltaicos de Puerto Peñasco, Santa María y Orejana en Sonora, Aura Solar en Baja California, Don Alejo en el Estado de México y Cuyoaco en Puebla.

Dualidad onda-partícula
Propiedad de la luz que le permite comportarse como onda o como partícula.

Efecto fotovoltaico

Para entender mejor este efecto, es necesario desglosar la palabra *fotovoltaico*. Este término está formado por *foto*, que proviene de la palabra *fotón* (luz), y *voltaico*, que proviene de la palabra *voltaje* (unidad de energía eléctrica). Entonces, se puede entender como el efecto de producir energía eléctrica mediante la luz. Sin embargo, el concepto de fotón tiene una base científica más profunda que nos remonta a inicios del siglo xx. En el año 1900, el científico alemán Max Planck propuso que la luz se emitía en paquetes de energía llamados "cuantos", lo que sugería que la luz podría tener características de partículas diminutas (véase la **Figura 1**). Aunque en ese momento esto era sólo una teoría y aún no se había comprobado la existencia de estas partículas, en 1905 Albert Einstein demostró que la teoría de Planck era correcta, comprobándola mediante un experimento conocido como el efecto fotoeléctrico (Cervantes-Cota y Rodríguez-Meza, 2006). De este modo, se consideró que la luz no sólo podía comportarse como una onda, sino también como un conjunto de partículas, conocidas como fotones, lo que constituyó el concepto de la **dualidad onda-partícula** de la luz.

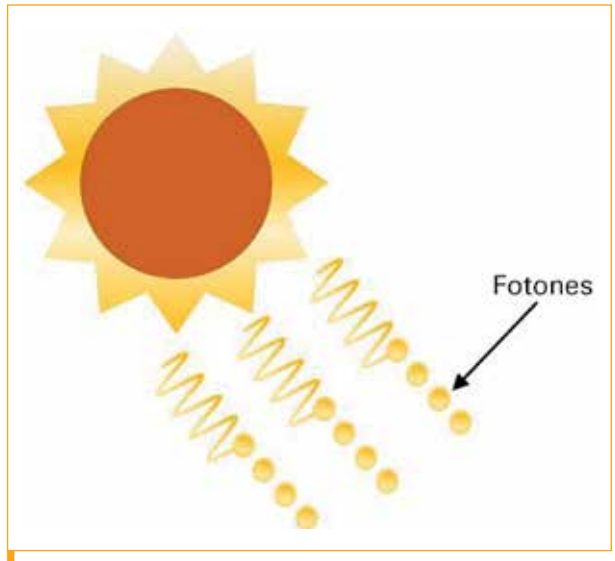

Figura 1. Presencia de fotones en la luz solar (dualidad onda-partícula). Elaborado por los autores.

Materiales semiconductores

Los semiconductores pueden clasificarse como un material intermedio entre los conductores y los aislantes, ya que su conductividad eléctrica aumenta ante estímulos energéticos como luz, calor o electricidad, lo que les permite comportarse como conductores. La característica que define a los semiconductores utilizados en celdas solares es su alta capacidad para reaccionar a los fotones incidentes para producir electricidad. En la actualidad, la mayoría de las celdas solares son fabricadas con silicio, el semiconductor más popular a la fecha.

Los materiales semiconductores se clasifican en semiconductores tipo *n* y semiconductores tipo *p*, cuya unión constituye la estructura básica de una celda solar llamada unión *n-p*. Los semiconductores tipo *n* se caracterizan por poseer un excedente de electrones dentro de sí, y los tipo *p*, por tener una mayor cantidad de huecos; un hueco se puede considerar una "partícula" con carga positiva, la cual es

generada por la ausencia de un electrón. El silicio puede ser un semiconductor tipo *n* o tipo *p*. La capacidad del silicio de adquirir un exceso de electrones o de huecos depende de que se agregue otro elemento a su estructura, al cual se le conoce como impureza. Por ejemplo, al agregar antimonio al silicio, se convertirá en un tipo *n*; mientras que si se le agrega otro elemento, como el galio, se volverá un tipo *p*. Supongamos que tenemos un millón de granitos de sal equivalentes a átomos de silicio y después agregamos cinco granos de azúcar equivalentes a átomos de antimonio. Se debe saber que un átomo de silicio sólo puede compartir cuatro de sus electrones (electrones de valencia), mientras que el antimonio, cinco. En ese sentido, al unir un granito de sal (silicio) con un granito de azúcar (antimonio), cuatro electrones provenientes del silicio se unirán a cuatro del antimonio, y sobra un electrón. Pero al tener cinco granitos de azúcar, se contará con un excedente de cinco electrones. De esta manera, el silicio se vuelve un semiconductor tipo *n* (véase la **Figura 2**).

Supongamos ahora que los cinco granitos de azúcar son equivalentes a átomos de galio y que éstos sólo pueden compartir tres de sus electrones (electrones de valencia). Entonces, al unir un granito de sal (silicio) con un granito de azúcar (galio), tres de los cuatro electrones del silicio se unirán con tres del galio, por lo que un electrón quedará sin enlazarse a otro. A esta ausencia de un electrón para enlazarse con el sobrante proveniente del silicio se le conoce como *hueco*. Pero al tener cinco granitos de azúcar, se contará con un excedente de cinco huecos. De este modo, el silicio se vuelve un semiconductor tipo *p* (véase la **Figura 2**).

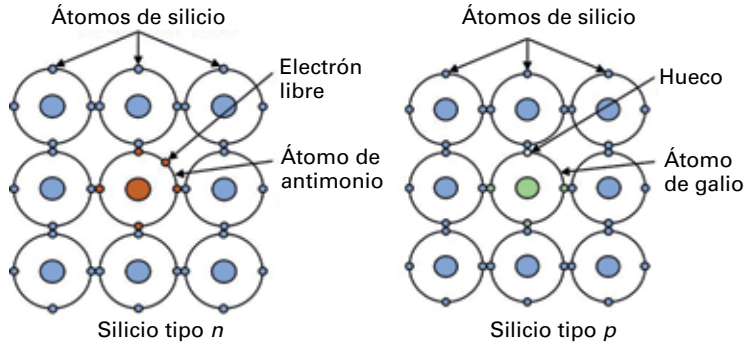

Figura 2. Semiconductor de silicio tipo *n* (izquierda) y tipo *p* (derecha). Elaborado por los autores.

Celdas solares

También llamadas celdas fotovoltaicas, debido al principio físico que las rige, son dispositivos bastante simples. Como ya se mencionó, están formadas por la unión de un semiconductor tipo *n* y uno tipo *p*, además de un contacto frontal y uno posterior, como se muestra en la **Figura 3**. El proceso para la generación eléctrica se describe a continuación. Los fotones provenientes del sol son absorbidos en su mayoría por el semiconductor tipo *p*, cuyo material es donde se lleva a cabo el efecto fotovoltaico. Un fotón al ser absorbido excita a un electrón, lo cual significa que el electrón adquiere suficiente energía para abandonar su sitio y ocupar un lugar vacío en otro átomo –lo que antes se definió como hueco–. Al haber tantos electrones que están siendo excitados energéticamente por los fotones, gran parte de ellos pasarán por el mismo proceso de ocupar un nuevo sitio, desplazándose hacia el semiconductor tipo *n* y llegando finalmente al contacto frontal de la celda (terminal positiva), mientras que los huecos se irán moviendo hasta llegar al contacto posterior (terminal negativa) (véase la **Figura 3**). Este movimiento de los electrones dentro de la celda solar produce un potencial eléctrico comúnmente conocido como

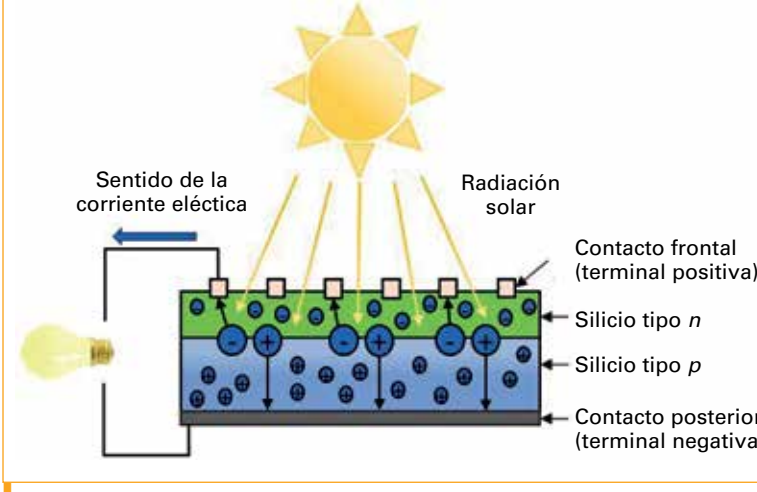

Figura 3. Esquema de una celda solar basada en silicio. Elaborado por los autores.

voltaje, pero al ser tantos electrones desplazándose de forma continua, se generará una corriente eléctrica, a lo que típicamente llamamos electricidad.

Actualmente, alrededor del 90 % de las celdas solares que se usan en el mundo emplean el silicio tipo *n* y tipo *p* como materiales fuente para generar electricidad, debido a que posee ciertas ventajas que lo hacen ideal, como su gran abundancia en el planeta, su nula toxicidad y su buena tasa de conversión de luz solar en electricidad, cuyo valor actualmente se encuentra en 26 %. Sin embargo, en las últimas décadas han surgido diferentes materiales en la búsqueda de mejorar la eficiencia de las celdas basadas en silicio, puesto que éstas se caracterizan por tener un alto costo de producción, dificultades para su almacenamiento –el cual es su principal inconveniente— y un bajo **coeficiente de absorción** (capacidad para absorber luz solar), lo cual requiere de un gran espesor (200 µm) para que puedan absorber la mayor parte de la luz incidente; es decir, se necesita una gran cantidad de silicio en las celdas para tener una buena eficiencia de conversión.

Superestrato
Configuración de una celda solar en la que la luz entra a través del vidrio.

TCO (*transparent conductive oxide*)
Material semiconductor que conduce electricidad y deja pasar la luz.

Coeficiente de absorción
Medida de qué tan bien puede un material absorber la luz.

Una buena alternativa a las celdas convencionales de silicio son las celdas solares de película delgada, debido a su simplicidad en cuanto a diseño, bajo costo de producción, menor cantidad de material y a su alta eficiencia de conversión, lo que las hace competitivas contra la tecnología tradicional de silicio. La celda basada en la estructura CdS/CdTe es una de las más importantes, pues tiene una eficiencia actual del 22.1 %. La gran diferencia entre las celdas basadas en silicio y las de película delgada radica en los espesores utilizados, ya que para la tecnología de CdS/CdTe, valores inferiores a los 100 nm para el CdS y menores a los 5 µm para el semiconductor CdTe son suficientes para convertir la energía del sol en electricidad, haciéndolos dispositivos mucho más económicos, debido a que se requiere una cantidad mínima de material.

Estas celdas solares se construyen en una estructura conocida, dentro del campo fotovoltaico, como **superestrato**, que consiste en la disposición: vidrio/TCO/CdS/CdTe/metal, como se muestra en la **Figura 4**. Primeramente, el material TCO (***transparent conductive oxide***) se deposita sobre vidrio común. Los TCO son óxidos semiconductores de alta conductividad eléctrica, cuya función es ser el contacto frontal (positivo) de la celda. Posteriormente, se realiza el crecimiento de la capa CdS tipo *n*, material que es deseable mantener lo más delgado posible.

A la estructura formada por el vidrio, TCO y CdS (vidrio/TCO/CdS) se le conoce como capa ventana, llamada así por la elevada transparencia que presentan estos materiales, lo cual permite que una alta fracción de la luz solar pueda llegar hasta el compuesto semiconductor CdTe tipo *p*, material que se deposita sobre el CdS. Esta capa se caracteriza por ser la más gruesa dentro de la celda solar y por tener un alto coeficiente de absorción; ambas propiedades favorecen que pueda absorber una gran cantidad de fotones para así promover el efecto fotovoltaico. Por último, se deposita una capa muy delgada del contacto posterior (negativo), comúnmente constituido por cobre y oro, dado que estos metales mejoran la conductividad eléctrica de la celda solar.

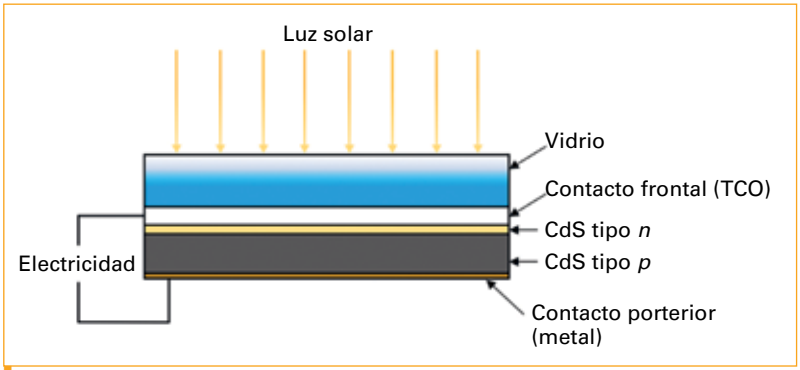

Figura 4. Estructura básica de una celda solar basada en los semiconductores CdS/CdTe. Elaborado por los autores.

Ventanas fotovoltaicas

En los últimos años, el rumbo de la investigación para las celdas solares de película delgada basadas en CdS/CdTe se ha dirigido a crear dispositivos fotovoltaicos con un adelgazamiento prominente de la capa del semiconductor CdTe tipo *p*. Si bien el diseño de un dispositivo solar que involucre una capa de CdTe de aproximadamente 2 µm permite semitransparencia, sin perder propiedades fundamentales que afecten la conversión de energía solar a eléctrica, no

es suficiente para ser considerado visiblemente semitransparente. Para ello, se requiere de una contundente reducción de la capa absorbente, lo cual representa grandes desafíos para el CdTe debido a que puede afectar en gran medida la captación de luz solar y, por ende, redundar en una baja eficiencia de conversión. Un régimen de espesores sumamente delgados es un gran desafío para la fabricación de celdas solares CdS/CdTe con elevada eficiencia y semitransparencia.

No obstante, la semitransparencia es una característica muy atractiva para las celdas fotovoltaicas basadas en CdS/CdTe debido a que estos dispositivos de película delgada, en un futuro cercano, podrán incorporarse como ventanas fotovoltaicas en edificios y viviendas o integrarse como techos panorámicos en automóviles, en los cuales se aprovecharía la luz del día para producir electricidad y, por otro lado, aportarían un valor estético, particularmente como un entintado.

Conclusiones

Las celdas solares fotovoltaicas son consideradas una alternativa viable que con el tiempo sin duda competirán con el carbón, el gas natural y el petróleo para producir electricidad. La investigación científica de los últimos años ha hecho grandes avances en los materiales semiconductores para uso en celdas solares, lográndose eficiencias récord, así como la reducción de los costos para su producción e implementación a gran escala. La reducción en el espesor del semiconductor CdTe permitiría la obtención de celdas solares semitransparentes (ventanas fotovoltaicas), las cuales son un campo poco explorado hasta el momento.

Agradecemos a la Universidad Autónoma de Querétaro por medio del fondo Química Somos Todos 2021, así como al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por la beca otorgada al estudiante de posgrado Nicolás Enrique Vázquez Barragán para la redacción de este artículo.

Nicolás Enrique Vázquez-Barragán
Facultad de Química, Materiales-Energía, Universidad Autónoma de Querétaro.
nevb92@gmail.com

Karen Rodríguez-Rosales
Facultad de Química, Materiales-Energía, Universidad Autónoma de Querétaro.
karen.uaq@outlook.com

Francisco Javier de Moure-Flores
Facultad de Química, Materiales-Energía, Universidad Autónoma de Querétaro.
fcomoure@hotmail.com

Referencias específicas

Arancibia Bulnes, C. y R. Best y Brown (2010), "Energía del sol", *Ciencia*, 61(2):10-17.

Cervantes-Cota, J. L. y M. A. Rodríguez-Meza (2006), "El efecto fotoeléctrico", *Revista Científica Multidisciplinaria de Prospectiva*, 13(3):303-311.

National Renewable Energy Laboratory (NREL), "Photovoltaic Research" [en línea]. Disponible en: ‹https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html›, consultado el 23 de abril de 2025.