

# Celdas solares orgánicas: una alternativa económica y sustentable

**Aldo Giovani Vázquez Guzmán  
Jairo César Nolasco Montaño**

La población mundial se ha incrementado de 2 mil millones a 8 mil millones en los últimos 70 años (Adam, 2022). ¿Y qué sucede con el recibo de consumo eléctrico de un departamento de una persona soltera cuando decide tener familia (una pareja, dos hijos, y una abuela)? Ese recibo puede pasar de \$200 a \$2,000. El crecimiento de la familia causa un incremento de su demanda de energía eléctrica. De la misma manera, la población mundial, a medida que se multiplica, demanda más energía eléctrica. Para cubrir las necesidades energéticas de una forma sostenible se han implementado fuentes de energía renovable como la energía solar.

La luz solar representa una alternativa energética ideal, porque a diferencia del petróleo, es abundante en todo el planeta y es gratis. En una hora, la Tierra recibe más energía del Sol que la energía que la población mundial consume en un año (Zhou, 2013).

La conversión de la energía solar a energía eléctrica ocurre mediante el efecto fotovoltaico. Este fenómeno fue observado por primera vez en 1839 (Becquerel, 1839). El efecto fotovoltaico es el proceso mediante el cual se convierten los rayos solares en electricidad utilizando una unión de materiales semiconductores.

Existen materiales que conducen la electricidad (conductores), materiales que no conducen la electricidad

(aislantes), y materiales que semiconducen la electricidad (semiconductores). Al incidir la luz solar sobre los materiales semiconductores que conforman las celdas solares, ocurre una transición de electrones de niveles energéticos poco conductivos hacia otros más conductivos. Lo anterior y un campo eléctrico interno originado por la unión de los semiconductores permite que los electrones fluyan libremente y generen corriente eléctrica.

Las celdas solares tienen como su principal parámetro de medida a su eficiencia de conversión de energía. Su eficiencia de conversión de energía representa la relación entre la energía de entrada y la energía de salida. Los rayos solares son la energía de entrada; y la potencia eléctrica que la celda solar entrega representa la energía de salida. La potencia eléctrica de salida está en función de la capacidad de los materiales de la celda solar para absorber luz solar y conducir la electricidad fotogenerada. Se busca que los materiales en una celda solar conviertan la mayor cantidad de rayos solares en energía eléctrica.

#### **CELDAS SOLARES**

Un sistema fotovoltaico comercial capta, transforma y suministra la energía proveniente del Sol. La captación se realiza mediante un panel fotovoltaico. El panel está compuesto por un conjunto de celdas solares. En esas celdas se lleva a cabo el efecto fotovoltaico para generar una corriente eléctrica, de modo que la corriente eléctrica de un panel fotovoltaico es la suma de las corrientes eléctricas de cada celda solar dentro del panel.

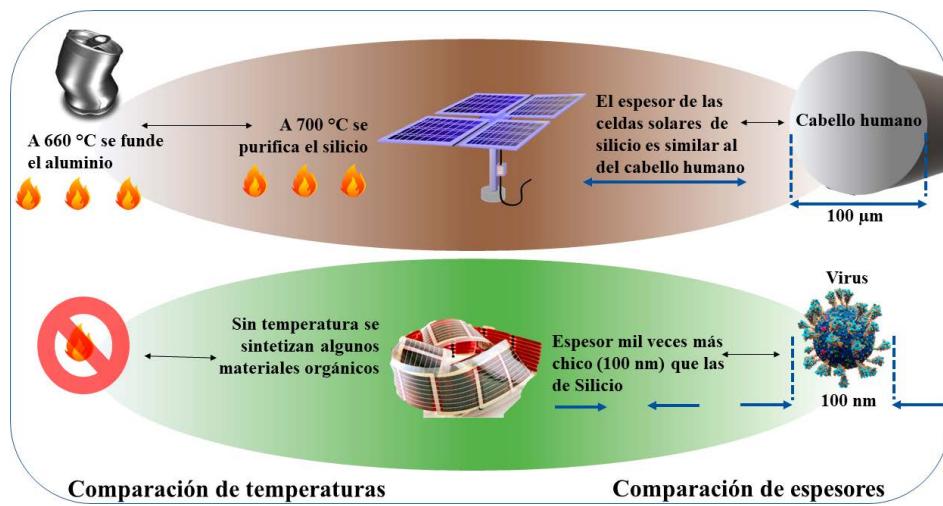
La energía eléctrica es obtenida en forma de corriente directa, por lo que requiere ser transformada en corriente alterna para ser utilizada en los hogares. El proceso de conversión a corriente alterna es efectuado en un dispositivo electrónico llamado inversor. Finalmente, la energía eléctrica, ya convertida en corriente alterna, puede ser usada para diferentes fines, como energizar luminarias o cargar celulares.

El silicio es el principal material de los paneles solares comerciales: el 95 % de los paneles solares están hechos con silicio. Este material se usa en las celdas solares por sus propiedades físicas ideales (ancho de banda y conductividad eléctrica) que favorecen el efecto fotovoltaico (Zhou, 2013). Sin embargo, el proceso de purificación del silicio requiere de altas temperaturas que incrementan los costos de fabricación. Esta limitante ha llamado la atención de la comunidad científica, por lo que se han investigado nuevos materiales para fabricar celdas solares de bajo costo, tales como los materiales orgánicos.

#### **VENTAJAS DE LAS CELDAS SOLARES ORGÁNICAS**

El silicio de alta pureza es un semiconductor con características eléctricas que favorecen a los dispositivos electrónicos. Entre los dispositivos electrónicos más destacados se encuentran los transistores y las celdas solares. Las celdas solares convencionales son fabricadas usualmente de silicio policristalino debido a que su relación costo-eficiencia es superior a la de otros materiales. Existen diferentes tipos de fabricación del silicio. En orden descendente de complejidad y costo, hay tres tipos de silicio utilizados como base en celdas solares convencionales: silicio cristalino, policristalino y amorfo. Las celdas solares basadas en dichos materiales tienen como limitante su complejo proceso de purificación y fabricación. Por ejemplo, el proceso de purificación del silicio ocurre a altas temperaturas, lo cual encarece la fabricación de dispositivos. Esto ha motivado a la comunidad científica a implementar nuevos materiales en celdas solares conocidas como emergentes.

Entre las celdas solares emergentes están las celdas solares fabricadas con materiales orgánicos. Tales materiales son económicos, flexibles y con un proceso de fabricación simple. La Figura 1 muestra la comparación de temperaturas de elaboración y de espesores de celdas solares de silicio y orgánicas. El silicio de alta pureza requiere para su elaboración de una temperatura de alrededor de 700 °C. En contraste, algunos materiales orgánicos



**Figura 1.** Comparación de temperaturas de elaboración y de espesores de celdas solares de silicio y orgánicas.

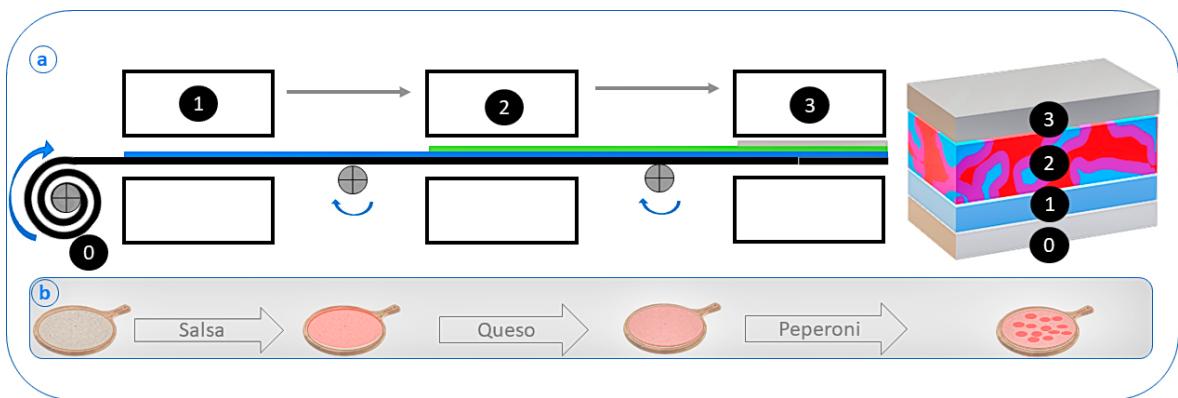
no requieren de altas temperatura y pueden ser fabricados a temperatura ambiente, alrededor de 23 °C. Esto hace que los materiales orgánicos utilicen menos energía para elaborarse, y por lo tanto, son menos costosos; además de que se requiere de menor cantidad de material para fabricar las celdas. El grosor de la capa que absorbe la luz en las celdas solares hace la diferencia en la cantidad de material empleado. El grosor del silicio en una celda solar es 0.0001 metros, grosor similar al del cabello humano, mientras que los materiales orgánicos tienen un grosor de 0.0000001 metros, grosor similar a la de un virus. Específicamente, se emplea alrededor de 1,000 veces menos material en las celdas solares orgánicas que en las celdas solares de silicio. Se ha estimado que el costo de las celdas solares orgánicas representa alrededor de una tercera parte del costo de las de silicio (Bhaskaran *et al.*, 2014).

#### FABRICACIÓN DE BAJO COSTO

Los materiales orgánicos se han implementado en diversas áreas de la electrónica, por ejemplo, las pantallas de televisión, los sensores médicos flexibles y las celdas solares. Los materiales orgánicos tienen varias ventajas cuando son usados en el campo fotovoltaico: 1) los materiales orgánicos son a menudo baratos de producir y se pueden

sintetizar utilizando materiales fácilmente disponibles; 2) son flexibles, lo que los hace ideales para superficies curvas; 3) se pueden procesar fácilmente utilizando técnicas basadas en soluciones (líquidos), como la impresión o el recubrimiento, lo que permite la producción en masa de dispositivos a bajo costo; 4) tienen menores requisitos de energía para la síntesis y el procesamiento en comparación con los materiales inorgánicos, lo que los hace energéticamente más eficientes en su etapa de producción; 5) la producción de materiales orgánicos genera menos residuos y puede ser más amigable con el medio ambiente que los materiales inorgánicos. El resultado de su ligereza es que con menos material salen más dispositivos. Se estima que si utilizas 1 kg de material orgánico, se podría fabricar una celda solar del tamaño de una cancha de fútbol profesional.

Existen principalmente dos factores que inciden en el costo de las celdas solares: el costo de los materiales y el costo de fabricación. Por el lado de los materiales, los métodos químicos de elaboración de los materiales orgánicos son más simples que los de silicio. El rango de temperatura que se suele utilizar es de 90 a 150 °C (Suresh *et al.*, 2022). Esto implica que un proceso escalable sea viable debido a que necesita menos energía térmica



**Figura 2.** (a) Proceso de fabricación de rollo a rollo de celdas solares orgánicas. (b) Analogía con la elaboración de una pizza.

para su fabricación. Por el lado de la fabricación, se emplea menos material en las celdas solares orgánicas que en las convencionales. Además, el proceso de depósito en solución con el cual las celdas solares orgánicas son fabricadas también favorece su escalabilidad.

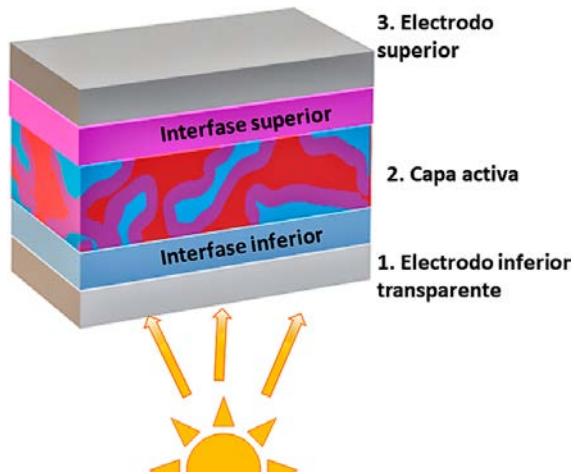
La comunidad científica fabrica las celdas solares orgánicas mediante la técnica de recubrimiento giratorio (*spin-coating*), la cual es relativamente simple, replicable y de bajo costo. La técnica consiste en depositar el material activo orgánico sobre un vidrio transparente. Posteriormente, este vidrio transparente (sustrato) se hace girar. Esta técnica funciona bien a nivel laboratorio, donde las muestras son de alrededor del tamaño de un sacapuntas ( $2\text{ cm}^2$ ). Sin embargo, en las celdas solares orgánicas la técnica tiene la desventaja de desechar la mayor parte del material que se deposita. Tales pérdidas en la industria juegan un papel en el costo final del dispositivo. Por eso se han popularizado métodos alternativos para fabricar las celdas solares orgánicas con base en procesos similares a la impresión de un periódico. Un ejemplo de esto es el depósito a gran escala por la técnica nombrada de “rollo a rollo” (*roll-to-roll*). Esta técnica permite el depósito de películas en el orden de los cientos de nanómetros (alrededor de 300 nanómetros) de espesor. La Figura 2 presenta el proceso de fabricación rollo a rollo de celdas solares orgánicas.

El esquema presenta una celda solar orgánica compuesta por cuatro capas. La capa cero representa el sustrato de plástico PET en forma de rollo sobre el cual está depositado un óxido conductor transparente. La capa 1 representa una película de transporte que sirve para evitar pérdidas en la interfaz. La capa 2 representa la película absorbadora de luz solar que será la encargada de convertir a corriente eléctrica los rayos solares. La capa 3 representa el contacto metálico por donde va a fluir la corriente. La configuración de la celda solar orgánica de la Figura 2 es relativamente simple, pero dependerá del diseño y de los materiales que se empleen.

#### INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA EN MÉXICO

¿Sabías que las celdas solares orgánicas han alcanzado en laboratorio eficiencias de alrededor de 19 %? Esta eficiencia fue alcanzada por un grupo de investigadores de la Universidad de Corea (Park *et al.*, 2023). Ellos estudiaron cómo mejorar la capa activa de la celda solar con base en una capa activa compuesta por tres materiales. A esta configuración se le conoce como de tipo ternario. Si se comparara con la eficiencia de las celdas solares convencionales que existen en el mercado, estaríamos hablando de una alta eficiencia.

La Figura 3 muestra un esquema de la arquitectura básica de una celda solar orgánica del tipo ternaria. La arquitectura consiste fundamentalmente de tres partes: electrodo superior, capa activa y



**Figura 3.** Esquema de la arquitectura básica de una celda solar orgánica del tipo ternaria.

electrodo inferior transparente. El efecto fotovoltaico sucede en la capa activa, generando dos flujos de cargas eléctricas, uno es negativo y el otro positivo. La carga eléctrica negativa fluye hacia el electrodo superior mientras que la positiva lo hace hacia el electrodo inferior transparente. Sin embargo, en el proceso de transporte de carga eléctrica de la capa activa a los electrodos, existen pérdidas en las interfases que se traducen en una reducción de la eficiencia. Si mejoramos las interfases entre la capa activa y los electrodos, se podría mejorar la eficiencia. Así, la eficiencia puede ser incrementada al mejorar los procesos que suceden en cada una de las partes del esquema.

En México, diversos trabajos de investigación se han enfocado en la implementación de nuevos materiales para los diferentes componentes de la configuración de una celda solar, particularmente la capa activa, las capas de transporte y los electrodos.

A continuación, se mencionan algunos ejemplos de aporte científico mexicano en cada una de las tres zonas de las celdas solares orgánicas:

1) En la capa activa. Romero-Borja *et al.* (2018) utilizaron grafeno en solución como componente en una capa activa compuesta de un polímero y una pequeña molécula. Ellos alcanzaron un incremento en la eficiencia de 5.5 % hasta 6.7 % al incorporar el grafeno en la capa activa.

2) En películas de transporte de carga eléctrica. Amargós *et al.* (2020) utilizaron óxido de grafeno mezclado con un polímero semiconductor como capa transportadora de huecos. Esto resultó en una eficiencia del 8.2 %, mientras que solo utilizar el óxido de grafeno resultó en una eficiencia del 5.3 %.

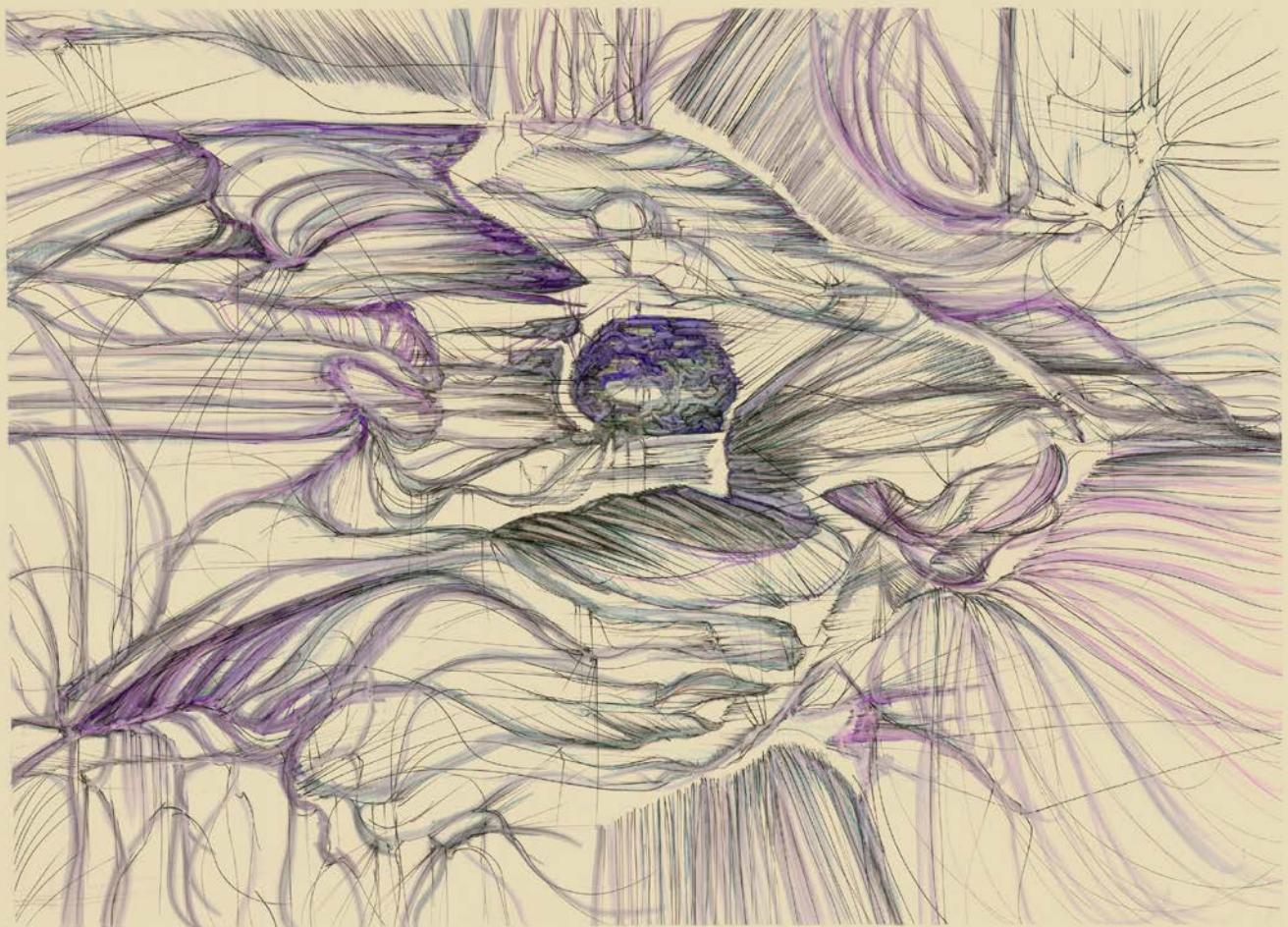
3) En los electrodos. Fernández *et al.* (2021) investigaron una alternativa al contacto transparente convencional usado en las celdas solares orgánicas. Para ello, utilizaron un derivado de grafeno mezclado con un polímero semiconductor procesado en solución. Al usar estos materiales, se logró una eficiencia de 4.2 %.

Nuestro grupo de investigación en Ciencia y Tecnología Sustentable (CITECSUS) se ha enfocado en explicar el comportamiento eléctrico de las celdas solares orgánicas. Para ello, se han implementado diversos modelos físicos (Nolasco *et al.*, 2019). Entender los factores que afectan a las celdas solares orgánicas sirve para diseñar el dispositivo e identificar cuantitativamente las peticiones de energía, para así proponer mejoras en el dispositivo.

Algunos retos en que la comunidad científica trabaja actualmente son: 1) la degradación de las celdas solares orgánicas debido al ambiente, y 2) la búsqueda de una alta eficiencia utilizando materiales orgánicos con métodos de elaboración simple. Se espera que en un futuro cercano estos temas sean comprendidos y sea posible diseñar y fabricar celdas solares orgánicas que compitan con los modelos comerciales.

## R E F E R E N C I A S

- Adam D (2022). World population hits eight billion –here's how researchers predict it will grow. *Nature*. Recuperado de: <https://doi.org/10.1038/d41586-022-03720-6>.
- Amargós O, Caballero I, Maldonado J-L, Nicasio J and Romero D (2020). Single graphene derivative layer as a hole transport in organic solar cells based on PBDB-T:ITIC. *Applied Optics* 59(27):8285.
- Becquerel AE (1839). Recherches sur les effets de la radiation chimique de la lumiere solaire au moyen des courants electriques. *C R Acad Sci* 9:145-149.
- Bhaskaran M, Sriram S and Iniewski K (2014). *Energy Harvesting with Functional Materials and Microsystems*. CRC Press.



© Héctor Salazar. Exp-animal-4-aco-met-20 mg, 50 x 70 cm, glossy paper, precision pen, 2023.

Suresh DS, Vandana M, Veeresh S, Ganesh H, Nagaraju YS, Vijeth H, Basappa M and Devendrappa H (2022). Low Cost Synthesis and Characterization of Donor P3HT Polymer for Fabrication of Organic Solar Cell. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 1221(1):012060.

Fernández Y, Maldonado J-L, Nicasio J, Meneses M-A, Rodríguez M, Barbosa O, Sierra U, Fernández S and Frontana BA (2021). Solution processable graphene derivative used in a bilayer anode with conductive PEDOT:PSS on the non-fullerene PBDB-T:ITIC based organic solar cells. *Solar Energy* 225: 656-665.

Nolasco JC, Castro-Carranza A, León YA, Briones C, Gutowski J, Parisi J and von Hauff E (2019). Understanding the open circuit voltage in organic solar cells on the basis of a donor-acceptor abrupt (p-n++) heterojunction. *Solar Energy* 184:610-619.

Park SH, Kwon NY, Jung SH, Harit AK, Woo HY, Cho MJ and Choi DH (2023). Enhanced Efficiency and Stability of Novel Pseudo-terinary Polymer Solar Cells Enabled by a Conjugated Donor Block Copolymer. *ACS Applied Materials & Interfaces* 15(16):20266.

Romero-Borja D, Maldonado J-L, Barbosa-García O, Rodríguez M, de León, A, Fernández S and Pérez-Gutiérrez E (2018). Organic solar cells based on graphene derivatives and eutectic alloys vacuum-free deposited as top electrodes. *Carbon* 134:301-309.

Zhou Y (2013). *Eco- and Renewable Energy Materials*. Springer Berlin Heidelberg.

**Aldo Giovani Vázquez Guzmán**  
**Jairo César Nolasco Montaño**  
**Centro de Investigación en Micro y Nanotecnología**  
**MICRONA, Universidad Veracruzana**  
**[janolasco@uv.mx](mailto:janolasco@uv.mx)**