



## Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: [www.riit.com.mx](http://www.riit.com.mx)

### Celdas solares: funcionamiento y estado actual

### Solar cells: performance and current status

González-Sánchez, T.<sup>1,2</sup>, Cerdán-Pasarán, A.<sup>3</sup>, Rose-Mathews, N.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, Temixco, Morelos, 62580, México.

<sup>2</sup> Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Avenida Universidad S/N, Col. Magisterial, C.P 86040. Villahermosa, Tabasco, México.

<sup>3</sup> Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Químicas, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, C.P. 66455, México.

[tegos@ier.unam.mx](mailto:tegos@ier.unam.mx); [andreaqcp@gmail.com](mailto:andreaqcp@gmail.com); [nrm@ier.unam.mx](mailto:nrm@ier.unam.mx)

**Innovación tecnológica:** Alternativas de energía amigable.

**Área de aplicación industrial:** Energías amigables.

Recibido: 26 diciembre 2022

Aceptado: 13 agosto 2023

### Abstract

The growing global demand for energy has pointed out the need to find solutions based on renewable energies as an alternative to the requirements of the population. Solar cells are devices capable of taking advantage of the solar energy to generate electricity. In this context, herein we detail the technological progress during the last two decades and its future prospects. The Mexican institutions and research centers investigating and developing photovoltaic devices as well as the main photovoltaic parks installed are outlined. Furthermore, the operation principle of the solar cells, the photovoltaic parameters to quantify its performance, such as power conversion efficiency, short circuit current density, open circuit voltage, and the incident radiation are described. Three generations of solar cells are described: the first generation includes monocrystalline and polycrystalline silicon, the second-generation solar cells are of thin-films, and the third generation comprises perovskite, kesterite, polymer, etc. Moreover, the elements, configurations and efficiencies are detailed. Finally, the characteristics of a panel and the complete requirements of the photovoltaic system for real applications are outlined.

**Keywords:** Solar cells, Photovoltaic effect, Power conversion efficiency, Solar energy.

## Resumen

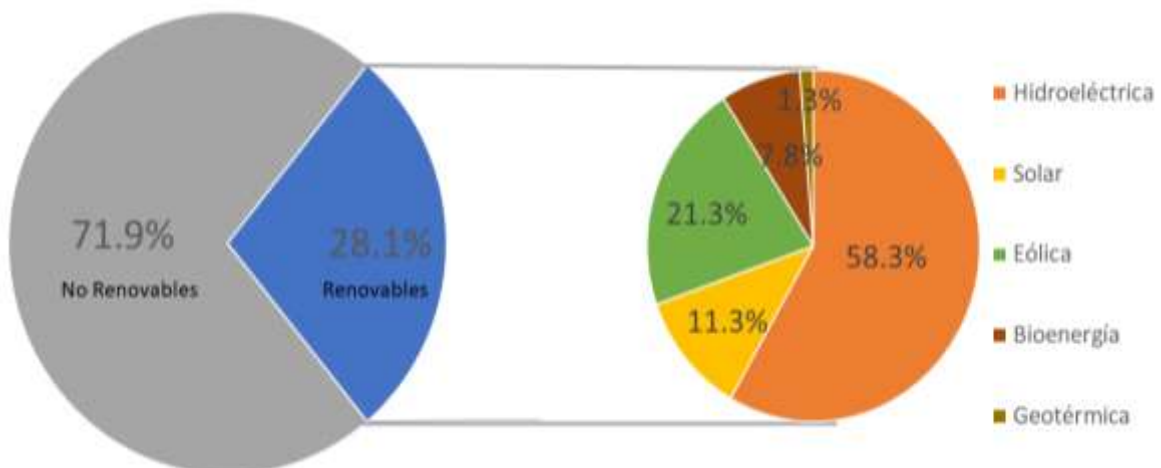
La creciente demanda de energía mundial ha llevado a la necesidad de investigar soluciones basadas en energías renovables como alternativa a los requerimientos de la población. Las celdas solares se presentan como una opción que permite aprovechar la energía solar como fuente de generación de energía eléctrica. En este contexto, el presente trabajo describe el progreso de esta tecnología a lo largo de las últimas dos décadas y su perspectiva de aplicación, así como las instituciones en México que han contribuido al estudio y desarrollo de estos dispositivos y los principales parques fotovoltaicos instalados. Además, se menciona el funcionamiento de las celdas solares, los parámetros a considerar para cuantificar su desempeño, tales como eficiencia de fotoconversión, densidad de corriente de corto circuito, voltaje de circuito abierto y su relación con la radiación solar incidente en el planeta. Tres generaciones de celdas solares son aquí abordadas, incluyendo las de primera generación tales como silicio mono y policristalino, de segunda generación como CdTe y CIGS, y las de tercera generación de perovskita, kesterita, celdas orgánicas, etc. Así mismo, sus elementos, configuraciones y eficiencias alcanzadas hasta el momento son detallados. Finalmente, se mencionan las características de un panel solar y los componentes de un sistema fotovoltaico el cual puede ser instalado en el lugar donde se desee aprovechar este tipo de energía mediante la tecnología fotovoltaica.

**Palabras clave:** Celdas solares, Efecto fotovoltaico, Eficiencia de fotoconversión, Energía solar.

## 1. Introducción

El inevitable agotamiento de los combustibles fósiles, aunado a los efectos adversos al medio ambiente generados por la emisión de gases de efecto invernadero, han señalado la necesidad de desarrollar nuevas tecnologías capaces de aprovechar los recursos renovables para proveer al ser humano de energía de forma limpia y sustentable.

De acuerdo con el informe de las Naciones Unidas, se prevé que la población mundial aumente de 7.7 mil millones a 9.7 mil millones de habitantes del 2019 al 2050, por lo que la demanda de energía eléctrica también se prevé que aumente [1]. Hasta el 2021, el consumo mundial de electricidad reportado fue de 24 877 TWh, de lo cual el 28.1% de esa energía fue producida mediante fuentes renovables (Fig. 1) [2].

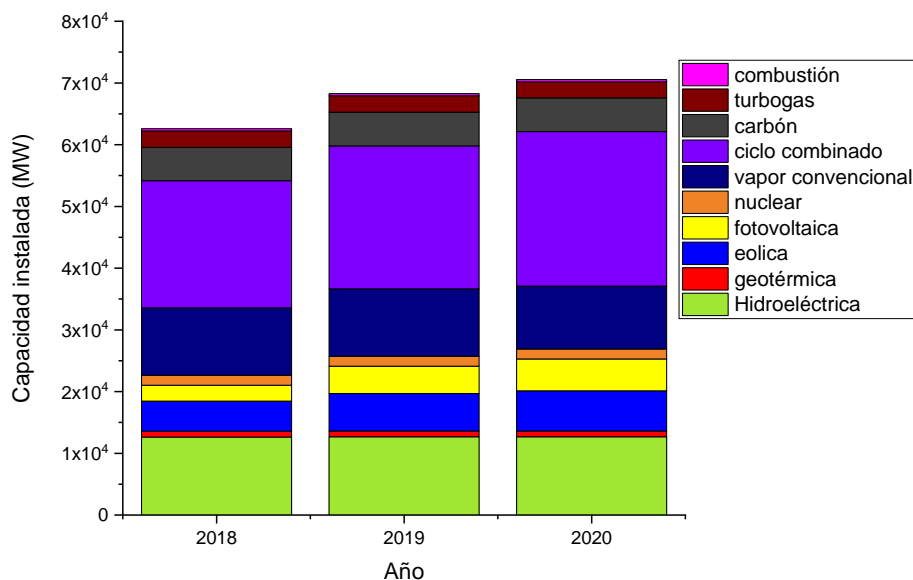


**Figura 1.** Aportación de las diferentes fuentes renovables a la generación de electricidad mundial en 2021 [3].

Por otro lado, la capacidad instalada de generación de energía eléctrica mundial a partir de fuentes renovables en 2022 fue de 3368 GW lo que representó un incremento de 293 GW (8.7%) respecto al 2021, siendo China el mayor generador. Entre los diferentes tipos de energías renovables, la energía solar es la que ha mostrado una mayor expansión contribuyendo con 1053 GW (192 GW más que el año previo), seguida de la energía eólica con 898 GW (74 GW más), la hidroeléctrica con 1255 GW (20 GW más) y la bioenergía con 148 GW (7 GW más) [3]. En el continente americano el principal generador de

electricidad a partir de la energía solar es Estados Unidos, el cual en 2022 generó 204 290 GWh [4].

En México actualmente la demanda de energía eléctrica es de 3 22 541 GWh siendo los combustibles fósiles el principal sistema energético (Fig. 2). Del total de energía eléctrica producida en 2021, el 29.5% corresponde a fuentes renovables mientras que el 70.5% restante se generó con hidrocarburos, sin embargo, se ha estimado que para el 2030 alcance una capacidad instalada de 109 GW a partir de fuentes renovables[5].



**Figura 2.** Evolución de la capacidad total instalada en México por tipo de tecnología.

Para tal fin en México se incluyó en el Plan Nacional de Desarrollo (2019-2024) actividades estratégicas en materia energética para fomentar la competitividad y el crecimiento económico. El Programa Sectorial de Energía (2020-2024) es el instrumento que rige la planeación de los objetivos y estrategias, el cual está a cargo de la SENER en colaboración con organismos como las Empresas Productivas del Estado, los órganos administrativos desconcentrados, las paraestatales y los órganos reguladores coordinados. Este programa contiene los principios de política energética tomando en consideración los acuerdos y tratados internacionales con los

que México se ha comprometido, tales como la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, el Protocolo de Kioto, la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, el Acuerdo de París y el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático en el ámbito del sector energético.

El Congreso de la Unión ha expedido leyes federales que regulan las actividades del Programa, entre las que destacan: la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal, Ley de Planeación, Ley de la Comisión Federal de Electricidad, Ley de la Industria Eléctrica, Ley de Transición

Energética (LTE), Ley de Energía Geotérmica, Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en Materia Nuclear, Ley General del Cambio Climático (LGCC), Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética y Ley para la Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos.

A partir de los compromisos internacionales adquiridos respecto al cambio climático y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, la SENER a través de la LTE publicada en el Diario Oficial de la Federación el 24 de diciembre de 2015, fijó como meta mínima el uso de energías limpias en la generación de energía eléctrica del 25% para 2018, 30% para 2021 y 35% para 2024.

La energía solar puede ser aprovechada por dos principales vías, a través de sistemas fotovoltaicos, también conocidos como celdas solares, que convierten la luz del sol en electricidad, o bien por el uso de concentradores solares, los cuales convierten el calor del sol en electricidad por medio de turbinas. Los concentradores solares comúnmente son usados en plantas a gran escala, mientras que las celdas solares permiten su uso comercial y residencial desde pequeña hasta gran escala. Del total de capacidad de generación de electricidad en 2022 por el aprovechamiento de la energía solar, el 99% corresponde a la tecnología fotovoltaica [3]. La radiación solar tiene amplia oportunidad de aprovechamiento en México ya que la cantidad de energía solar que recibe al día es de ~5 kWh por cada metro cuadrado (Fig. 3).



Figura 3. Potencial eléctrico fotovoltaico en el territorio mexicano.[6]

## 2. ¿Cómo funcionan las celdas solares?

Las celdas solares convierten la energía solar a energía eléctrica mediante el efecto fotovoltaico. Antes de explicar en qué consiste el efecto fotovoltaico es importante mencionar que este dispositivo está

compuesto por la unión de dos materiales semiconductores inorgánicos (uno tipo p y uno tipo n) llamada “unión p-n”. Un metal conduce electricidad, un aislante no conduce y un semiconductor conduce más que un aislante, pero menos que un metal. El semiconductor tiene la ventaja de que

puede modificarse para que conduzca más o menos electricidad incorporando átomos de otro elemento en el semiconductor. A estos átomos que se incorporan se le llaman “impurezas”. Cuando estas impurezas atrapan electrones en el semiconductor existe más concentración de huecos y se le llama semiconductor tipo-p, mientras que con impurezas que ceden electrones al semiconductor, existe mayor concentración de electrones (portadores mayoritarios) y se le llama semiconductor tipo-n. Esta unión de semiconductores genera un campo eléctrico interno (E) en la interfaz de la unión (Fig. 4). El efecto fotovoltaico

ocurrirá cuando la celda solar se expone a la radiación solar y los fotones que inciden en la capa absorbidora generan un excitón el cual da lugar al par electrón-hueco formado en la interfaz de las capas p-n. Si entre los extremos posteriores (contactos metálicos) se conecta una carga eléctrica, por ejemplo, una lámpara, los electrones se moverán en dirección contraria al campo eléctrico interno dando lugar a un flujo de corriente eléctrica. Esta energía eléctrica puede ser aprovechada directamente por un aparato eléctrico/electrónico o bien almacenada en una batería.

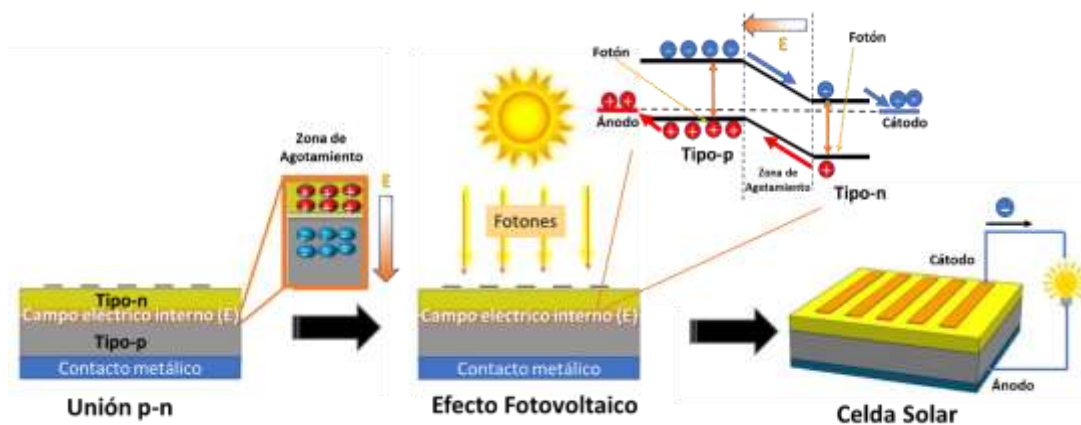


Figura 4. Esquema del efecto fotovoltaico.

## 2.1 Incidencia de la radiación solar en una celda fotovoltaica

Como se mencionó anteriormente, una celda solar necesita de la radiación solar que es emitida desde el núcleo del sol y llega a la superficie terrestre para llevar a cabo el efecto fotovoltaico. Para estandarizar el desempeño de las celdas solares, se ha definido el espectro de radiación solar con valor de  $1000 \text{ W/m}^2$  al que se le llama AM1.5G. Como se observa en la Fig. 5, esta radiación es más intensa en longitudes de onda desde  $\sim 400 \text{ nm}$  hasta  $\sim 800 \text{ nm}$  (rango visible). En una celda solar se busca obtener el mayor aprovechamiento de la radiación solar, así que éstas se diseñan para que absorban luz principalmente en dicha región. De acuerdo con cálculos teóricos establecidos, para que una celda solar logre una máxima conversión de energía solar a

eléctrica, es decir su mayor eficiencia, tendrá que absorber fotones alrededor de los  $885 \text{ nm}$ , que corresponde a una energía de  $1.34 \text{ eV}$  [7]. Este valor de energía es característico de cada material y se le conoce como ancho de banda prohibida, la cual se define como el espacio entre el máximo de la banda de valencia y el mínimo de la banda de conducción (Fig. 6). La banda de valencia es el nivel más alto en el que los electrones están presentes a la temperatura de cero absoluto. La banda de conducción es el nivel más bajo que los electrones pueden ocupar cuando los electrones son excitados.

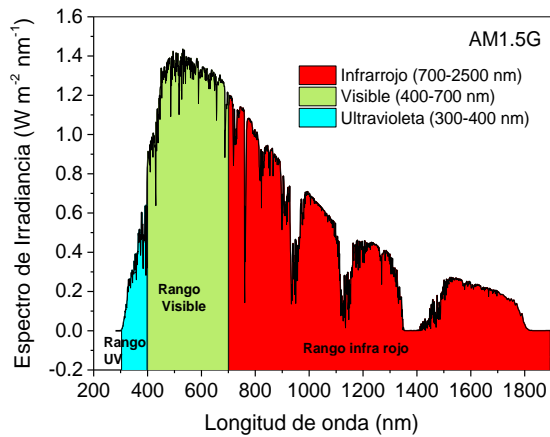


Figura 5. Espectro de irradiación solar AM1.5G.

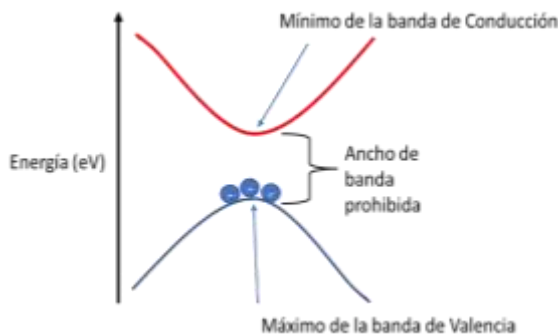


Figura 6. Diagrama de bandas de energía de un semiconductor.

### 2.2 ¿Cómo se calcula la eficiencia de una celda solar?

Para entender cómo se calcula la eficiencia de conversión de energía solar a eléctrica de una celda solar primero se debe mencionar que una celda solar durante su funcionamiento producirá un flujo de electrones al que se le llama corriente eléctrica (I). En ambos extremos de la celda existirá una diferencia de potencial al cual se le llama voltaje (V). La corriente eléctrica generada en una celda solar cuando el voltaje es cero se le llama corriente de corto circuito ( $I_{sc}$ ), y al máximo voltaje que se produce cuando no hay corriente se le llama voltaje de circuito abierto ( $V_{oc}$ ). Estos parámetros son importantes para calcular el porcentaje de eficiencia ( $\eta$ ) de una celda solar. Esta se mide en un laboratorio con un simulador solar que emula la radiación del sol con una potencia de  $1000 \text{ W/m}^2$  a  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . La celda es iluminada aplicando un rango de voltaje y midiendo la corriente y esos datos se

grafican obteniendo la curva corriente-voltaje (I-V) como se muestra en la Fig. 7. En el punto donde corta el eje X se obtiene el  $V_{oc}$ , mientras que en la intersección con el eje Y se obtiene la  $I_{sc}$ . El punto de máxima potencia ( $P_{max}$ ) que genera una celda solar se define por el voltaje de máxima potencia ( $V_{max}$ ) y la corriente de máxima potencia ( $I_{max}$ ). Nótese que la potencia puede ser calculada como el área del cuadrado que se encuentra dentro de la curva (Fig. 9), es decir,  $P_{max} = V_{max} I_{max}$ .

El factor de forma (FF) es otro parámetro utilizado para definir la calidad de una celda solar mediante la siguiente relación:

$$FF = \frac{V_{max} I_{max}}{V_{oc} I_{sc}}$$

Entre más se acerquen los valores máximos a los valores de  $V_{oc}$  y  $I_{sc}$ , la curva I-V tendrá una forma más cuadrada y mejor calidad tendrá la celda solar. Entonces, con todos los parámetros anteriores calculados se puede determinar la eficiencia de conversión ( $\eta$ ) con la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{FF V_{oc} I_{sc}}{G A}$$

Donde A es el área de la celda solar y G es la potencia de iluminación incidente.

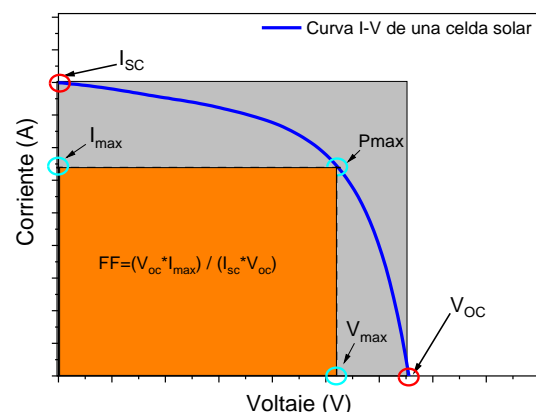


Figura 7. Curva I-V de una celda solar iluminada con  $1000 \text{ W/m}^2$  a  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  AM1.5G.

### 2.3 Evolución de las celdas solares

La investigación y desarrollo de las celdas solares ha evolucionado a lo largo de las

últimas cinco décadas dando lugar a 3 generaciones, como se observa en el esquema de la Fig. 8.

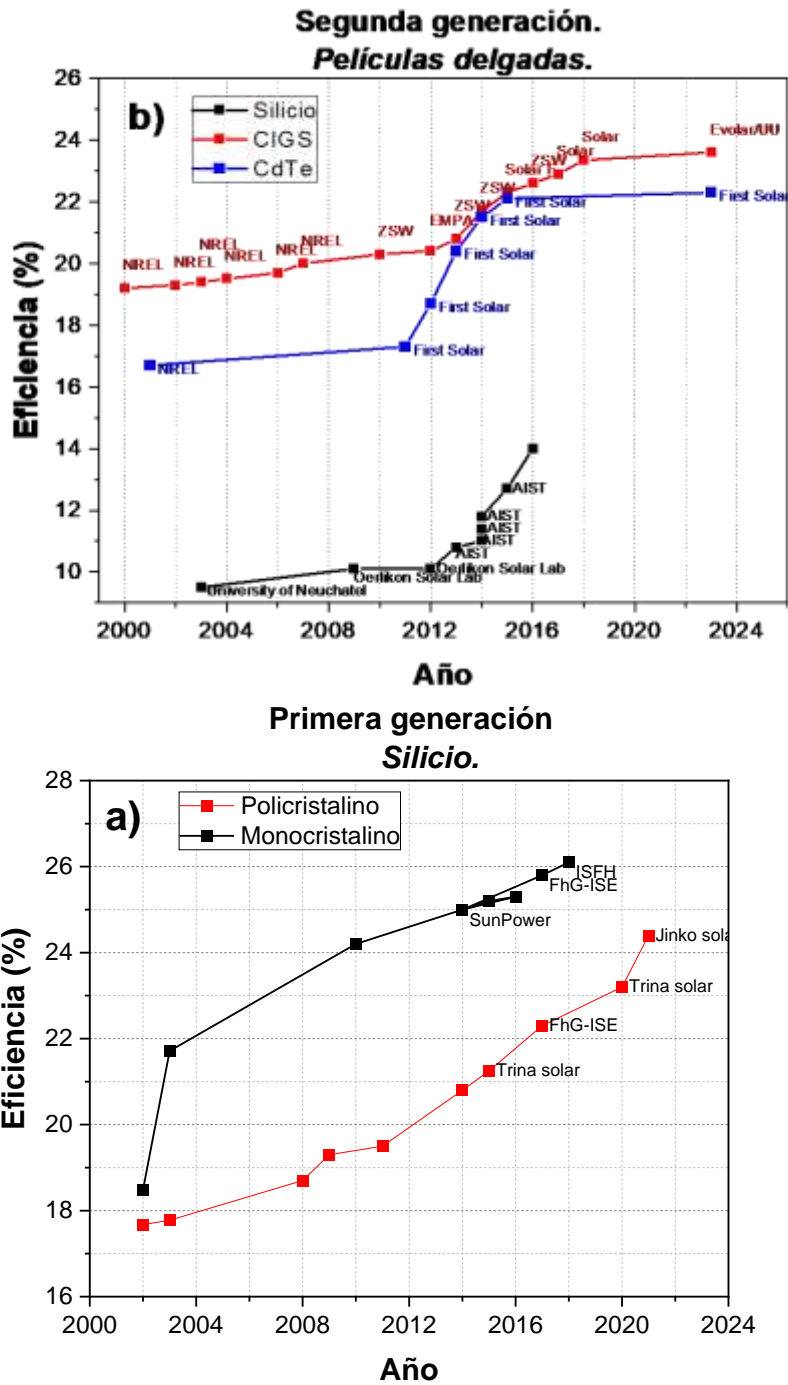


**Figura 8.** Esquema de la clasificación de celdas solares por generaciones.

La primera generación consiste en celdas solares basadas en semiconductores de estado sólido con silicio cristalino. Algunas celdas han sido dopadas con elementos como el boro y el fósforo que le confieren propiedades específicas para un mejor desempeño. Su desventaja ha sido el costo elevado, el tiempo de fabricación y su alta fragilidad. En la Fig. 9a se muestra la gráfica de las mayores eficiencias obtenidas hasta el momento.

La segunda generación incluye las celdas solares de película delgada, las cuales son una promesa para su utilización a nivel industrial ya que disminuyen los costos de producción significativamente en comparación con la primera generación. Entre éstas se encuentran las celdas solares

de silicio amorfo, de telurio de cadmio (CdTe) y las celdas compuestas de cobre, indio, galio y selenio (CIGSe). Las eficiencias reportadas en el mundo para esta segunda generación se muestran en la Fig. 9b. En México han fabricado y estudiado estas celdas solares buscando su mejoramiento en diversos grupos de investigación, por ejemplo, la escuela Superior de Física y Matemáticas del IPN en colaboración con la Universidad Autónoma de la Ciudad de México han reportado una celda solar de CdTe con una eficiencia de 12.6% [8], mientras que en el CINEVESTAV-IPN unidad Mérida, Yucatán lograron una eficiencia del 14% [9]. De acuerdo con cálculos teóricos, las celdas de primera y segunda generación están limitadas a un 33% de eficiencia [7].



**Figura 9.** Eficiencias récord de celdas solares a) primera generación y b) segunda generación [10].

La tercera generación de celdas solares surgió con el objetivo de usar materiales abundantes en la corteza terrestre, no tóxicos y de alta eficiencia, ya que en la segunda generación elementos utilizados como el telurio y el indio son escasos en la naturaleza mientras que el cadmio y el selenio son tóxicos. Esta tercera generación comprende las celdas orgánicas, las sensibilizadas con colorantes naturales o

con puntos cuánticos y las de perovskita. Las eficiencias reportadas en el mundo para esta generación se muestran en la Fig. 10. En México, para esta generación se han reportado celdas de perovskita con eficiencias de 18.04% y 19.8% por el Instituto de Energías Renovables (IER-UNAM) [11,12] y 19.45% por el Centro de Investigaciones en Óptica (CIO) [13]. Para celdas solares con elementos abundantes,



no tóxicos y de bajo costo como es la de  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  (CZTS), también conocida como kesterita, se ha reportado una eficiencia de 7.7% por el Centro de Investigación en Dispositivos Semiconductores (BUAP) [14] y 7% por el IER-UNAM con celdas de CZTSGe [15].

Para celdas orgánicas se han logrado eficiencias de 8.7% por el grupo de CINEVESTAV-IPN [16], 7.65% por el grupo de propiedades ópticas de la materia (CIO) [17] y 2.79% por el Centro de Investigación en Biotecnología y Nanotecnología (CIBYN) [18].

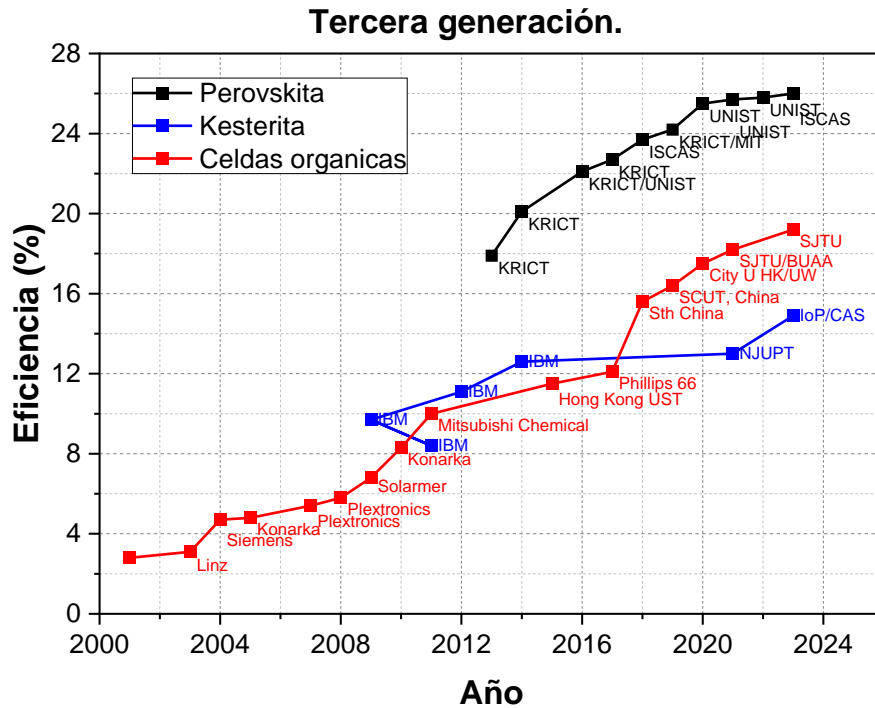
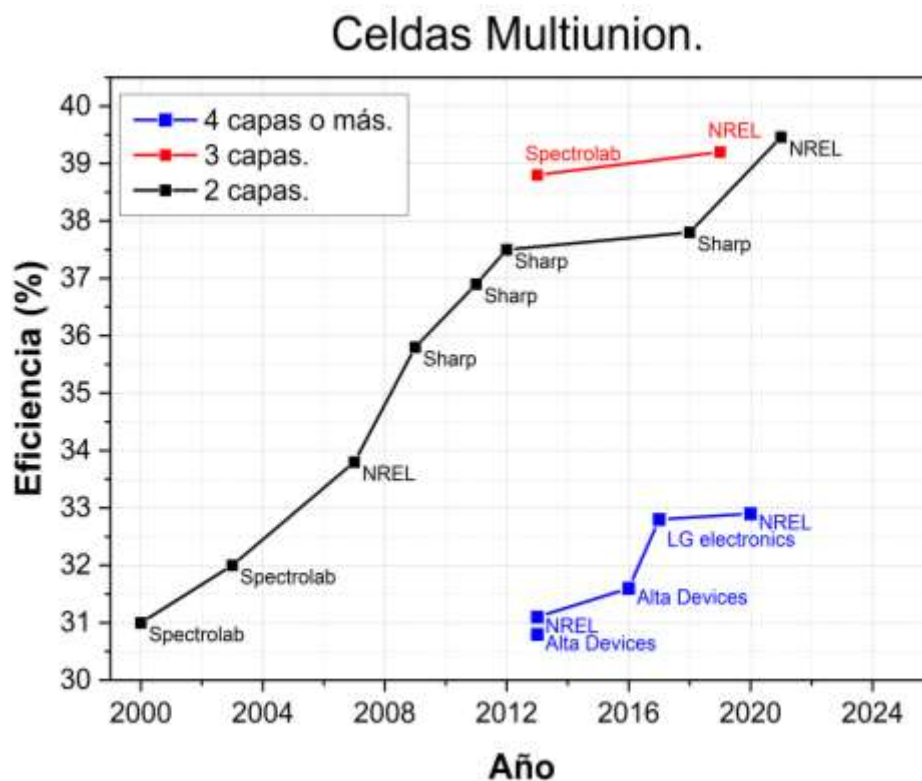


Figura 10. Valores de eficiencia de las celdas solares de tercera generación.

### 3. Celdas multiunión

Las celdas solares se pueden fabricar con una configuración de multiunión, tándem o de cascada que tiene la ventaja de eliminar la limitante de un ancho de banda de energía prohibida único, puesto que estos dispositivos funcionan con un conjunto de celdas individuales colocadas una encima de la otra. De acuerdo con su banda de energía prohibida, la celda que se coloca

arriba absorbe los fotones de alta energía y deja pasar el resto de los fotones que podrán ser absorbidos por las otras celdas que se encuentran debajo con ancho de banda de energía prohibida menores. De esta manera, se puede aprovechar mayor rango del espectro solar. Actualmente se ha logrado superar el 40% de eficiencia (ver Fig. 11), sin embargo, de acuerdo con cálculos teóricos se podría lograr eficiencias de hasta 86.8% [19].



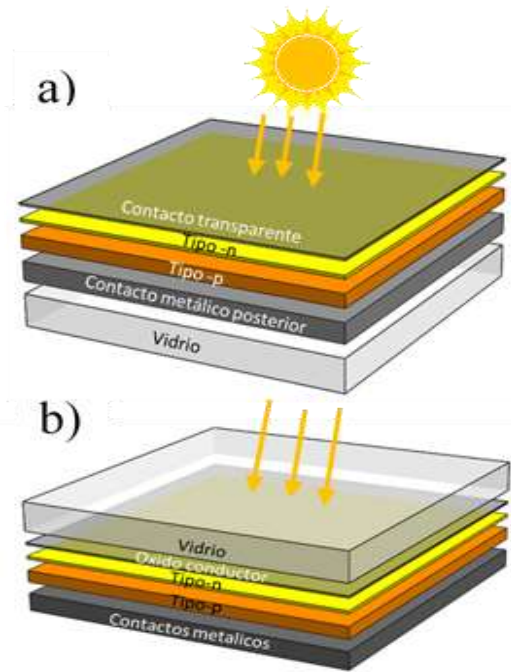
**Figura 11.** Eficiencia de las celdas solares de multiunión.

Como se ha observado, las eficiencias de conversión de energía solar de las celdas siguen en constante evolución para poder alcanzar un valor cercano a su límite SQ teórico. El uso de materiales más abundantes, menos tóxicos y nuevas técnicas de depósito ha permitido el desarrollo de nueva tecnología, resultando en la disminución de los costos y tiempos en la fabricación de las celdas solares. Además, el mejoramiento en la calidad de los métodos de fabricación ha permitido obtener una mayor uniformidad de los materiales, reducción de la rugosidad superficial y bajar la densidad de defectos estructurales como poros, aumentando así el rendimiento de la producción industrial con menor inversión de capital [20–22]. Sin embargo, la comunidad científica aún tiene retos por superar y que actualmente siguen estudiando, tales como pérdidas por efectos fototérmicos [23] y temperatura [24], reducir costos de las tecnologías fotovoltaicas [25], entre otros.

### 3.1 Configuraciones posibles en la fabricación de celdas solares.

En general, una celda solar está conformada por un sustrato, una capa ventana, una capa absorbadora y un contacto metálico. Cada uno de estos componentes tiene propiedades físicas y químicas diferentes que contribuyen con la eficiencia global de las celdas.

Las celdas solares de película delgada pueden ser fabricadas en dos configuraciones diferentes: sustrato o superestrato. En la primera, el sustrato es cubierto por una capa metálica que actúa como contacto, seguida del depósito de la capa absorbadora (tipo-p), la capa ventana (tipo-n) y finalmente la capa de óxido conductor transparente (TCO) (Fig. 12 a). Para la segunda configuración, el sustrato es recubierto por el TCO seguida de la capa ventana (tipo-n), posteriormente la capa absorbadora (tipo-p) y finalmente el contacto metálico (Fig. 12b).



**Figura 12.** Configuraciones posibles de celdas solares de película delgada a) tipo sustrato y b) tipo superestrato.

El sustrato puede estar fabricado de vidrio, polímeros (para el caso de celdas flexibles) o bien de láminas metálicas como acero, cobre, titanio, entre otros. Algunos de los materiales comúnmente usados para capa de TCO son el óxido de estaño dopado con flúor (FTO), óxido de estaño e indio (ITO) y el óxido de zinc dopado con aluminio (AZO). La capa ventana típicamente usada es de sulfuro de cadmio (CdS). En el caso de la capa absorbidora varios semiconductores binarios como telurio de cadmio (CdTe), sulfuro de plomo (PbS) y sulfuro de antimonio ( $Sb_2S_3$ ), ternarios como el sulfuro de cobre indio (CuInS) e incluso cuaternarios como el sulfuro de cobre indio galio (CuInGaS) y el sulfuro de cobre zinc estaño ( $Cu_2ZnSnS_4$ ) han sido probados. El contacto metálico usado puede ser de oro, plata o cobre.

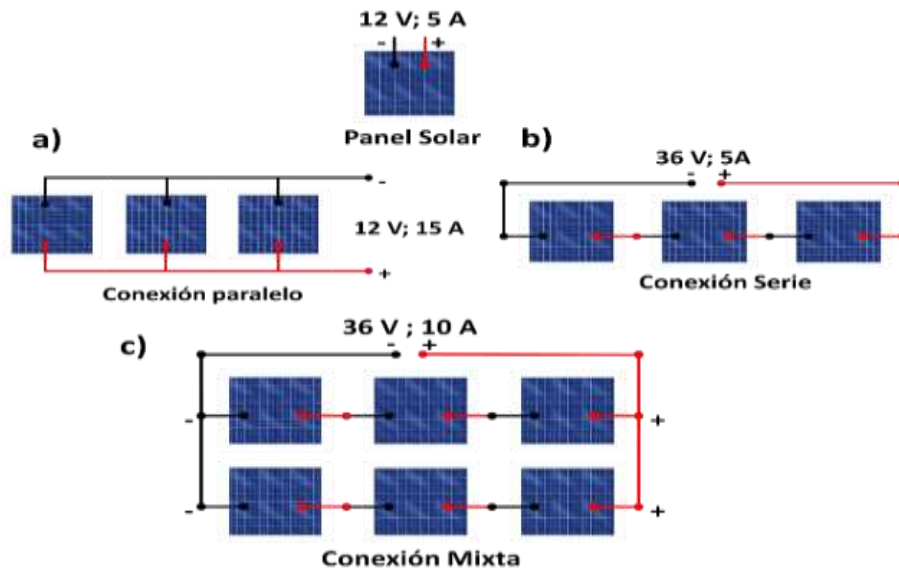
En México existen diferentes centros de investigación enfocados en celdas solares a

escala laboratorio y módulos, tales como el Instituto de Energías Renovables (IER-UNAM), el Instituto Politécnico Nacional (IPN), el Centro de Investigaciones en Óptica (CIO), el Centro de Investigaciones y de Estudios Avanzados (CINVESTAV), el Centro de Investigaciones en Materiales Avanzados (CIMAV), la Universidad Autónoma de Nuevo León, la Universidad de Guadalajara, la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, la Universidad del Estado de Morelos, la Universidad de Sonora, Universidad Autónoma de San Luis Potosí y la Universidad Autónoma de Querétaro, entre otros. Estas instituciones han recibido financiamiento de parte del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) y de la Secretaría de Energía (SENER) para desarrollar proyectos relacionados con investigación y tecnología en energía solar.

Así mismo, existen asociaciones civiles dedicadas a buscar alianzas, colaboraciones estratégicas, divulgación y promoción para el desarrollo y fomento de las celdas solares en beneficio del medio ambiente y la sociedad, como lo son la Asociación Mexicana de la Industria Fotovoltaica (AMIF), la ASOLMEX, la Asociación Nacional de Energía Solar (ANES) y la Red Iberoamericana de Energías Renovables (RedREN).

### 3.2 Componentes de un sistema fotovoltaico.

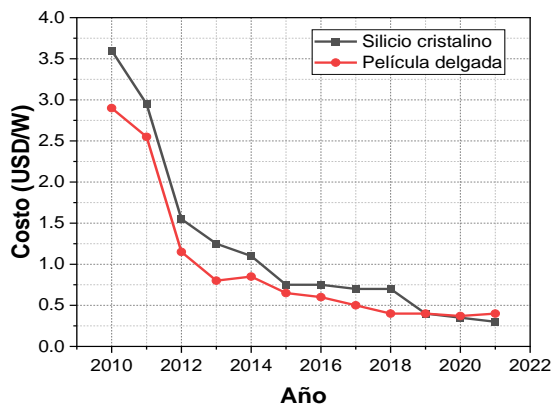
Un módulo o panel fotovoltaico está formado por varias celdas solares conectadas eléctricamente en serie o paralelo. Una conexión paralela incrementa la corriente total manteniendo el voltaje (Fig. 13a) y una conexión en serie mantiene la corriente, pero incrementa el voltaje (Fig. 13b).



**Figura 13.** Esquema representativo de la conexión eléctrica en un panel solar.

Al panel fotovoltaico se le coloca un vidrio del lado donde incide la luz solar, el cual tiene una barrera de resina en la parte trasera, de esta manera permitiendo el paso de la luz mientras se protege a los semiconductores de elementos externos, tales como el polvo, lluvia, granizo, etc.

Por otro lado, los costos de los módulos fotovoltaicos han disminuido 93% en una década (de 2010 a 2020), con un decremento promedio de 5-15% anual. El precio de los módulos depende del tipo de tecnología, sin embargo, en 2020 los precios de los módulos más vendidos oscilaron entre \$0.19 USD/W y \$0.40 USD/W (Fig. 14). Este rango de costos fue 10% menor que el reportado en 2019 [26].



**Figura 14.** Costo promedio de módulos fotovoltaicos por tecnología [26].

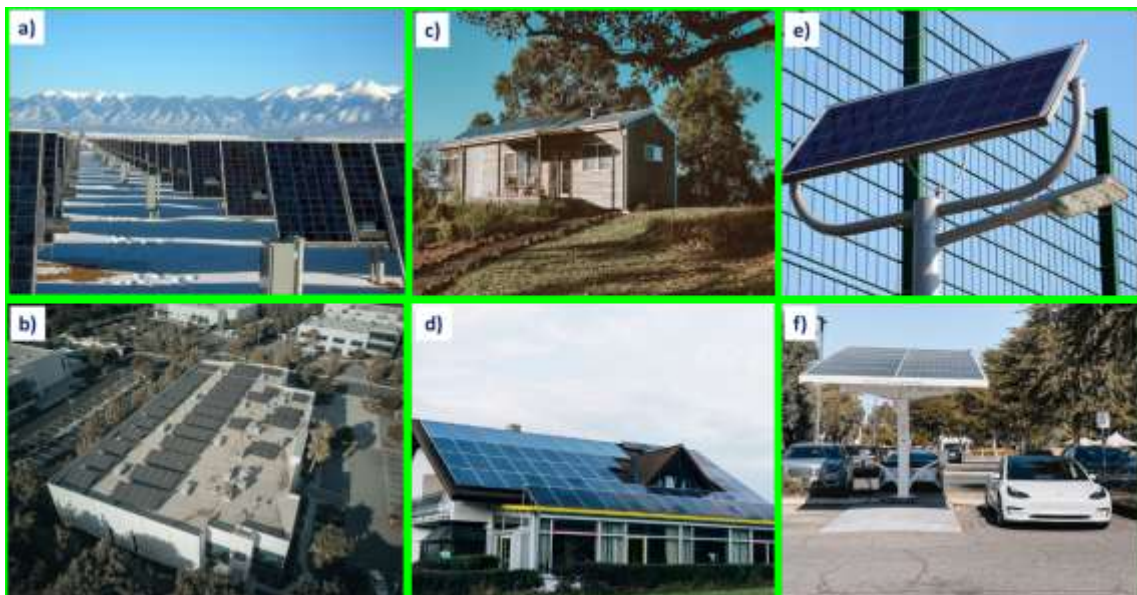
Los componentes en una instalación de paneles solares van a depender del tipo de conexión y puede clasificarse en sistema fotovoltaico aislado o sistema fotovoltaico conectado a la red. En términos generales el primer caso está compuesto de: 1) paneles solares (convierten la energía solar en energía eléctrica), 2) baterías (almacenan la energía generada), 3) regulador (regulan el voltaje), 4) inversor (convierten la corriente directa (DC) en corriente alterna (AC) para poder ser utilizada en las casas, industrias, oficinas etc.) y 4) protecciones (protegen a las personas y al sistema fotovoltaico en caso de algún accidente). El sistema conectado a la red consiste en: paneles solares, inversor, protecciones y medidor bidireccional (su función es cuantificar la energía consumida de la red eléctrica cuando no hay energía generada por el sistema fotovoltaico o cuantificar la energía que se aporta a la red en caso de un exceso de generación de energía) (Fig. 15).



**Figura 15.** Representación de un sistema fotovoltaico doméstico conectado a la red eléctrica.

Actualmente existen diferentes aplicaciones de las celdas solares que van desde parque solares, grandes fábricas, satélites, casas en zonas rurales y urbanas, transporte eléctrico público y privado hasta equipos como semáforos solares, bombeo de agua, iluminación pública, sistemas de riego,

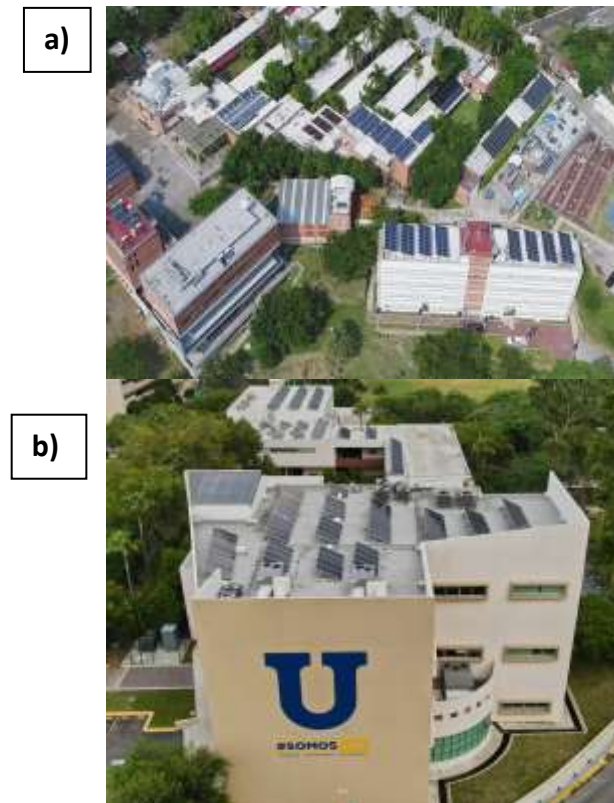
robots, juguetes, entre otros [27,28]. También puede combinarse con otras fuentes renovables, como la energía eólica, para almacenamiento de hidrógeno y bombeo de agua [29]. En la siguiente figura se presenta algunas aplicaciones del uso de celdas solares (Fig. 16).



**Figura 16.** Ejemplos de aplicaciones usando celdas solares: a) parque fotovoltaico para la generación de electricidad en miles de watts, b) industria usando celdas solares, c) casa con sistema fotovoltaico aislado, casa con sistema fotovoltaico conectado a la red, e) alumbrado usando celdas solares y f) cargador fotovoltaico para autos eléctricos.

En centros de investigación de energías renovables como el Instituto de Energías Renovables se han instalado paneles fotovoltaicos en diversos edificios con una capacidad de 172 kWp. Por otro lado, en 2020 la Universidad Autónoma de Nuevo

León, campus Mederos, instaló 1502 paneles fotovoltaicos con una capacidad de generación de 2 227 kWh/día que evitarán la emisión de 700 toneladas de dióxido de carbono a la atmósfera.



**Figura 17.** Fotografía aérea de paneles solares instalados en a) el Instituto de Energías Renovables-UNAM y b) Universidad Autónoma de Nuevo León, campus Mederos.

En México operan parques fotovoltaicos en 16 entidades federativas, siendo 67 parques de gran escala comercial de acuerdo con la Asociación Mexicana de Energía Solar (ASOLMEX). Entre los que poseen mayor capacidad de generación se encuentran Pima Solar I, Don Diego Solar, Tuto II y Navjoa Solar PV en Sonora con capacidad de 110, 125, 137 y 224 MW respectivamente, Border Solar Norte y Santa María en Chihuahua, con capacidad de 150 y 166 MW, Laguna Solar, Villanueva III y Villanueva I ubicados en Coahuila, con capacidad de 100 MW, 275 MW y 363 MW, respectivamente, Tuli Energía con 165 MW en Zacatecas, Santiago con 200 MW en San Luis Potosí, Trompezón, Solem II, Solem I y Pachamama en Aguascalientes, con capacidad de 126, 140, 150 y 300 MW, respectivamente, Viborillas y FRV Potrero Solar con 113 y 270 MW en Jalisco, Don José con 250 MW en Guanajuato, Guajiro con 116 MW en Hidalgo, Magdalena II con 220 MW en Tlaxcala, y Cuyoaco y Parque Solar FV Tepeyahualco con 220, Tlaxcala

con 594 MW, la Pimienta en Campeche con 300 MW y 100 MW en Puebla [30].

#### 4. Conclusión

Las celdas solares son dispositivos capaces de generar energía eléctrica a partir de la conversión de la energía solar por medio del efecto fotovoltaico. La radiación solar es considerada energía limpia e inagotable.

A lo largo del tiempo las celdas solares han ido evolucionando y actualmente se clasifican en 3 generaciones, la primera generación tiene como protagonista al silicio, usado como material semiconductor, sin embargo, tienen un costo elevado, principalmente debido a su proceso de fabricación. La segunda generación son las celdas solares de película delgada, esta tecnología ha disminuido el costo de fabricación, pero utilizan materiales escasos y tóxicos como el caso del telurio, cadmio, selenio, galio, indio, entre otros. La tercera generación usa materiales abundantes y no tóxicos

buscando fabricar celdas solares con eficiencias altas a bajo costo.

Actualmente, México cuenta con grupos de científicos que trabajan en desarrollar este tipo de tecnología, obteniendo celdas de CdTe con eficiencias de hasta 14%, dispositivos de perovskita con eficiencia de 19.8%, celdas de CZTS con hasta 7.7% de eficiencia y celdas orgánicas con eficiencias de 7.65%.

### 5. Agradecimientos

Al Proyecto PAPIIT IN102921, Tenoch González Sánchez agradece al proyecto postdoctoral nacional CONAHCyT 2022 (1).

#### Referencias

- [1] U. Nations, World population prospects-population division-united nations, World Population Prospects-Revision. (2015).
- [2] Energías renovables en la producción de electricidad | Mapa estadístico por regiones | Enerdata, (n.d.). <https://datos.enerdata.net/energias-renovables/produccion-electricidad-renovable.html> (accessed July 4, 2023).
- [3] IRENA – International Renewable Energy Agency, (n.d.). <https://www.irena.org/> (accessed July 4, 2023).
- [4] Electricity Data Explorer | Open Source Global Electricity Data | Ember, (n.d.). <https://ember-climate.org/data/data-tools/data-explorer/> (accessed July 4, 2023).
- [5] Programa para el Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2022-2036 | Centro Nacional de Control de Energía | Gobierno | gob.mx, (n.d.). [https://www.gob.mx/cenace/documentos/programa-para-el-desarrollo-](https://www.gob.mx/cenace/documentos/programa-para-el-desarrollo-del-sistema-electrico-nacional-2022-2036)
- del-sistema-electrico-nacional-2022-2036 (accessed July 4, 2023).
- [6] Solargis s.r.o. (“Solargis”) on behalf of the World Bank Group (“World Bank Group”), Mexico - Solar Irradiation And PV Power Potential Maps, (2023).
- [7] W. Shockley, The Shockley-Queisser limit, *J. Appl. Phys.* 32 (1961) 510–519.
- [8] A. P. González Arceo, De Moure, P G Contreras, Sastre H Jorge CBD, CSS y sputtering en la respuesta fotovoltaica de celdas y módulos fotovoltaicos de CdTe, Conference: XXXVIII Semana Nacional de Energía Solar. ANES, 2014
- [9] A. Rios-Flores, O. Arés, J.M. Camacho, V. Rejon, J.L. Peña, Procedure to obtain higher than 14% efficient thin film CdS/CdTe solar cells activated with HCF<sub>2</sub>Cl gas, *Solar Energy.* 86 (2012) 780–785.
- [10] Best Research-Cell Efficiency Chart | Photovoltaic Research | NREL, (n.d.). <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html> (accessed July 4, 2023).
- [11] C.F. Arias-Ramos, Y. Kumar, P.G. Abrego-Martínez, H. Hu, Efficient and stable hybrid perovskite prepared at 60% relative humidity with a hydrophobic additive in anti-solvent, *Solar Energy Materials and Solar Cells.* 215 (2020) 110625.
- [12] Y. Kumar, E. Regalado-Perez, J.J. Jerónimo-Rendón, X. Mathew, Effect of Cs<sup>+</sup> and K<sup>+</sup> incorporation on the charge carrier lifetime, device performance and stability in perovskite solar cells, *Solar Energy Materials and Solar Cells.* 236 (2022) 111512.
- [13] S. Sidhik, D. Esparza, A. Martínez-Benítez, T. Lopez-Luke, R. Carriles, I. Mora-Sero, E. De la Rosa,

- Enhanced photovoltaic performance of mesoscopic perovskite solar cells by controlling the interaction between CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> films and CsPbX<sub>3</sub> perovskite nanoparticles, *The Journal of Physical Chemistry C*. 121 (2017) 4239–4245.
- [14] E. Ojeda-Durán, K. Monfil-Leyva, J. Andrade-Arvizu, I. Becerril-Romero, Y. Sánchez, R. Fonoll-Rubio, M. Guc, Z.J. Li-Kao, J.A. Luna-López, E. Saucedo, High efficiency Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> solar cells over FTO substrate and its CZTS/CdS interface passivation via thermal evaporated Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>., *Journal Of*. 6 (2018).
- [15] T.G. Sanchez, E. Regalado-Pérez, X. Mathew, M.F. Sanchez, Y. Sanchez, E. Saucedo, N.R. Mathews, Ge doped Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub>: An investigation on absorber recrystallization and opto-electronic properties of solar cell, *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 198 (2019) 44–52.
- [16] M. Godfroy, J. Liotier, V.M. Mwalukuku, D. Joly, Q. Hualmé, L. Cabau, C. Aumaitre, Y. Kervella, S. Narbey, F. Oswald, Benzothiadiazole-based photosensitizers for efficient and stable dye-sensitized solar cells and 8.7% efficiency semi-transparent mini-modules, *Sustain Energy Fuels*. 5 (2021) 144–153.
- [17] O. Amargós-Reyes, J.-L. Maldonado, D. Romero-Borja, D. Barreiro-Argüelles, I. Caballero-Quintana, O. Barbosa-García, J.A. Gaspar, Organic photovoltaic cell analysis through quantum efficiency and scanning tunneling microscopy of the donor/blend as an active film, *J Mater Sci*. 54 (2019) 2427–2445.
- [18] S. Borbón, S. Lugo, D. Pourjafari, N. Pineda Aguilar, G. Oskam, I. López, Open-Circuit Voltage (V<sub>OC</sub>) enhancement in TiO<sub>2</sub>-based DSSCs: incorporation of ZnO nanoflowers and Au nanoparticles, *ACS Omega*. 5 (2020) 10977–10986.
- [19] F. Dimroth, S. Kurtz, High-efficiency multijunction solar cells, *MRS Bull*. 32 (2007) 230–235.
- [20] Z. Jin, Z. Zhang, J. Xiu, H. Song, T. Gatti, Z. He, A critical review on bismuth and antimony halide based perovskites and their derivatives for photovoltaic applications: recent advances and challenges, *J Mater Chem A Mater*. 8 (2020) 16166–16188.  
<https://doi.org/10.1039/D0TA05433J>.
- [21] I. Massiot, A. Cattoni, S. Collin, Progress and prospects for ultrathin solar cells, *Nature Energy* 2020 5:12. 5 (2020) 959–972.  
<https://doi.org/10.1038/s41560-020-00714-4>.
- [22] L. Qiu, L.K. Ono, Y. Qi, Advances and challenges to the commercialization of organic–inorganic halide perovskite solar cell technology, *Mater Today Energy*. 7 (2018) 169–189.  
<https://doi.org/10.1016/J.MTENER.2017.09.008>.
- [23] Z. Liu, B. Sun, Y. Zhong, X. Liu, J. Han, T. Shi, Z. Tang, G. Liao, Novel integration of carbon counter electrode based perovskite solar cell with thermoelectric generator for efficient solar energy conversion, *Nano Energy*. 38 (2017) 457–466.  
<https://doi.org/10.1016/J.NANOEN.2017.06.016>.
- [24] H. Heidarzadeh, Performance Analysis of an HJ-IBC Silicon Solar Cell in Ultra-High Temperatures: Possibility of Lower Reduction Efficiency Rate, *Silicon*. 12 (2020)



- 1369–1377.  
<https://doi.org/10.1007/S12633-019-00230-5>/METRICS.
- [25] H. Ding, D.Q. Zhou, G.Q. Liu, P. Zhou, Cost reduction or electricity penetration: Government R&D-induced PV development and future policy schemes, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 124 (2020) 109752.  
<https://doi.org/10.1016/J.RSER.2020.109752>.
- [26] M. Stefanides, *Renewable Power Generation Costs in 2020: Cost Declines and Record Capacity Additions-TUESDAY, 22 JUNE 2021• 14: 00-14: 30 CEST*, (2021).
- [27] W.B.C. Cevallos, D. Rojas, L. Dominguez, B. Cruz, M. Yerovi, *La energía fotovoltaica*, *Revista Contribuciones a La Economía*. (2019).
- [28] A.H. Alami, M. Ramadan, M.A. Abdelkareem, J.J. Alghawi, N.T. Alhattawi, H.A. Mohamad, A.-G. Olabi, Novel and practical photovoltaic applications, *Thermal Science and Engineering Progress*. 29 (2022) 101208.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tsep.2022.101208>.
- [29] A. Haddad, M. Ramadan, M. Khaled, H.S. Ramadan, M. Becherif, Triple hybrid system coupling fuel cell with wind turbine and thermal solar system, *Int J Hydrogen Energy*. 45 (2020) 11484–11491.
- [30] Centrales – Asolmex, (n.d.). <https://asolmex.org/centrales-solares/> (accessed July 4, 2023).