

Tres generaciones de celdas solares: Alternativas para un mundo más sustentable

Gabriela S. Anaya-González y Jesús Rodríguez-Romero *.

Group of Advanced Materials for Energy Research (GAMER-Lab), Departamento de Química Orgánica, Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Ciudad de México, México.

* Autor de correspondencia: jrr@quimica.unam.mx.

Artículo de divulgación científica

Recibido: 27 de septiembre de 2024

Aceptado: 29 de octubre de 2024

Publicado: 18 de noviembre de 2024

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v3i1.195>

Resumen: La conversión de energía solar a electricidad mediante el uso de celdas solares proporciona una solución a la creciente demanda energética y a la crisis ambiental provocada por la emisión de gases de efecto invernadero. Desde la aparición de la primera celda solar a mediados del siglo pasado hasta la actualidad, se han aplicado diferentes estrategias para mejorar eficiencias y aumentar la accesibilidad a esta tecnología. Esto ha generado la exploración continua de una gran variedad de materiales, así como arquitecturas de fabricación. La evolución tecnológica de las celdas solares se divide en tres generaciones, las cuales presentan diferentes características. En el presente trabajo se realiza una discusión de las tres generaciones de celdas solares, haciendo énfasis en los principios de su funcionamiento, materiales que la conforman, eficiencias alcanzadas y retos por resolver. Actualmente, la primera y segunda generación de celdas solares dominan el mercado debido a su alta eficiencia y durabilidad, sin embargo, tecnologías emergentes, de tercera generación, conllevan procesos de fabricación más económicos y amigables con el medio ambiente. Hoy en día, cada una de las generaciones presenta desafíos por superar, abriendo oportunidades de investigación en la aplicación de diversos materiales y en el diseño de nuevas arquitecturas.

Palabras clave: Células solares; Materiales fotovoltaicos; Tecnologías emergentes; Celdas solares.

Introducción

El uso de combustibles fósiles como fuente principal de energía es el mayor responsable del cambio climático, debido a que origina grandes emisiones de gases de efecto invernadero (Mondragón, 2021). Uno de los principales retos actuales es el desarrollo de energías alternativas que suplan la demanda energética actual y cuya producción sea más amigable con el medio ambiente. El aprovechamiento de la luz solar es una de las mayores oportunidades para reducir los efectos negativos al medio ambiente originado por el uso de combustibles fósiles. La principal manera de hacer uso de la energía solar es mediante su conversión a energía eléctrica, utilizando celdas solares. Las celdas

solares basan su funcionamiento en el uso de materiales semiconductores, los cuales son la piedra angular de la nanotecnología y especialmente del área fotovoltaica, debido a que tienen la propiedad de absorber radiación que comprenden longitudes de onda que van desde el ultravioleta (UV) hasta el infrarrojo (IR), produciendo con ello corrientes eléctricas. A este fenómeno se le conoce como efecto fotovoltaico y es un proceso fundamental que ocurre cuando las partículas elementales que conforman la luz, llamados fotones, inciden en los electrones de un semiconductor, transfiriéndoles la suficiente energía para liberarlos de su orbital, permitiéndoles moverse dentro del material. Tras ser liberados, los electrones dejan espacios vacíos, es decir huecos de electrones los cuales podríamos considerar como cargas positivas. Cuando un electrón libre se encuentra con un hueco se genera un proceso llamado recombinación, el cual usualmente implica disipación o pérdida de la energía que se absorbió en el primer paso. La mayoría de los semiconductores tiene presencia mayoritaria de algún tipo de portador de carga, refiriéndose como semiconductores tipo *n* a los que presentan exceso de electrones y tipo *p* a los que presentan exceso de huecos. El diseño de una celda solar se basa fundamentalmente en la unión de un semiconductor tipo *p* y uno tipo *n*. A la interfaz entre estos dos materiales se le llama unión *pn*, y es un elemento esencial en la conversión de energía, debido a que,

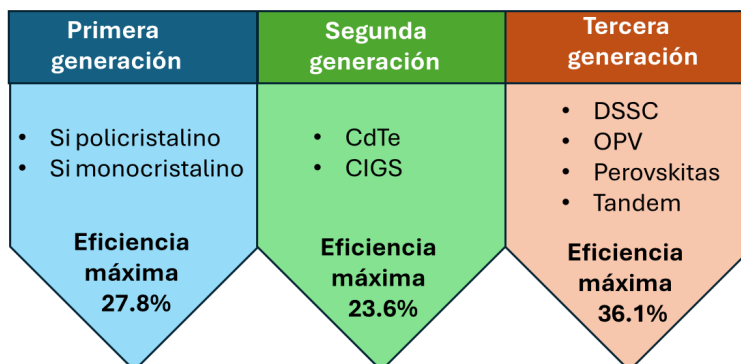


Figura 1. Diagrama de los principales representantes de las tres generaciones de celdas solares y las eficiencias máximas reportadas para cada una.

a lo largo de esta región existe la presencia de un campo eléctrico, el cual conduce a los electrones libres hacia el lado n de la unión, y a los huecos al lado p , impidiendo su recombinación. Usualmente el desempeño de una celda solar se cuantifica a partir de su eficiencia de conversión, la cual indica el porcentaje de radiación solar captada que se convierte en electricidad utilizable. Las tecnologías fotovoltaicas se suelen dividir en tres generaciones, cuyo orden sigue la cronología en las que sus principales representantes tuvieron su primera aparición (Figura 1), aunque todas ellas siguen vigentes en la actualidad. El surgimiento de las tres generaciones de celdas solares se debe a la continua investigación para aumentar las eficiencias de conversión, disminuir costos de producción y reducir el impacto ambiental que genera su fabricación.

Desarrollo

Celdas solares de primera generación

Esta generación domina aproximadamente el 95% del mercado actual de celdas solares y se caracteriza por el uso del silicio, ya sea en su forma cristalina o policristalina, como material absorbente (Beatriz Santos, 2022). Cabe destacar que el silicio es el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre y el semiconductor más utilizado. Los primeros dispositivos fotovoltaicos fabricados forman parte de esta generación y fueron producidos en 1954 por laboratorios Bell con una eficiencia de 8% (Lee et al., 2015). Tras su primera aparición, la eficiencia de conversión de las celdas solares de silicio ha ido en constante aumento, llegando actualmente a valores superiores al 25% (*Best Research-Cell Efficiency Chart*, 2024). En el contexto de aplicaciones fotovoltaicas existen dos tipos de silicio, el monocristalino y el policristalino, los cuales exhiben propiedades diferentes cuando son utilizados como materiales absorbentes. El silicio monocristalino presenta una estructura cristalina perfecta y continua, que solo se interrumpe en los bordes, lo que permite a los electrones que participan en la corriente eléctrica viajar más fácilmente dentro del material, evitando perderse en procesos disipativos. Debido a lo anterior, las celdas solares de silicio monocristalino presentan eficiencias de conversión impresionantes, siendo el récord actual de 27.6 %, obtenido por Kaneka Corporation en el 2017 (Sena, 2021). Por otro lado, el silicio policristalino está compuesto de gran cantidad de cristales microscópicos o cristalitos, los cuales no exhiben una estructura cristalina continua, debido a ello las celdas solares de silicio policristalino presentan menores eficiencias de conversión (ya que se observa una mayor cantidad de procesos de pérdida de energía no observados en silicio monocristalino). Sin embargo, su proceso de producción es más simple, disminuyendo costos y aumentando la accesibilidad a estas tecnologías. La arquitectura utilizada en esta generación es principalmente de unión pn simple, la cual consiste en el depósito de silicio tipo n , sobre una capa de silicio tipo p , que junto a los contactos metálicos alcanzan espesores en el rango de 200 a 500 micrómetros (Figura 2a). Estos dispositivos tienen tiempos de vida operacionales de aproximadamente 25 años y, a pesar de que regularmente exhiben tasas de degradación de 0.5% a 1% anuales, siguen presentando buenos rendimientos después de dos décadas (Oh et al., 2019). La combinación de propiedades tales como eficiencias competitivas y durabilidad, convierten a las celdas solares derivadas del silicio en la tecnología

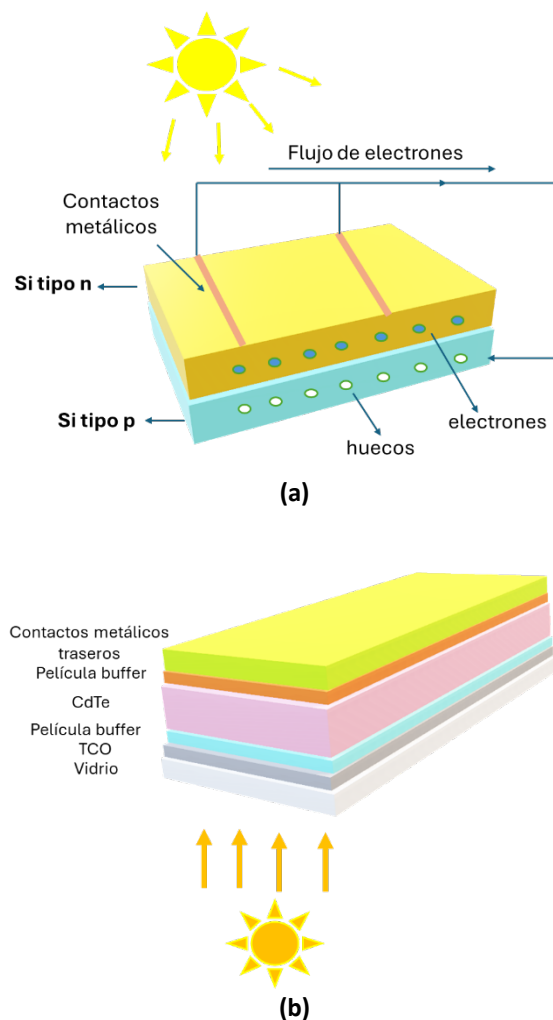


Figura 2. Arquitecturas de celdas solares presentadas en distintas generaciones: (a) Arquitectura de unión pn simple de primera generación. Si=silicio (b) heteroestructura de segunda generación que incluye como sustrato un óxido conductor transparente (TCO) y las capas tipo buffer que facilitan el transporte de carga.

fotovoltaica más consolidada. Las investigaciones actuales se enfocan en aumentar su rendimiento, a través de estrategias como el utilizar superficies texturizadas en la parte frontal, para minimizar la reflexión de luz incidente y el diseño de estructuras que combinan silicio con otros semiconductores para aumentar el rango del espectro solar captado (Manzoor et al., 2020). A pesar de que esta tecnología es actualmente la opción más sólida a una transición energética total, esto no se ha logrado debido a que el proceso de fabricación de celdas solares de silicio cristalino conlleva altos costos, los cuales son transferidos al usuario final, limitando su accesibilidad en masa (Ballif et al., 2022). De los inconvenientes anteriores se hace necesario el desarrollo de nuevas generaciones de celdas solares que, mediante nuevos enfoques, proponen procesos de fabricación más sencillos, con menor cantidad de material y con costos de fabricación más bajos.

Celdas solares de segunda generación

Si bien la tecnología derivada del silicio cristalino ha demostrado altos rendimientos y durabilidad, el proceso de obtención de silicio puro a partir de su materia prima (SiO_2) conlleva temperaturas mayores a 1800°C y la generación de residuos altamente contaminantes (Dubey et al., 2013). La segunda generación de celdas solares, también llamada tecnología de película delgada surge de la búsqueda de materiales alternativos cuyo procesamiento sea tanto más económico, así como amigable con el medio ambiente. Los mayores representantes de esta generación son los dispositivos fabricados a base del compuesto telururo de cadmio (CdTe) y de una solución sólida formada por cobre-indio-galio-seleniuro (CIGS). A diferencia de las celdas solares de silicio cristalino, la arquitectura de una celda solar de película delgada consiste en la formación de una heteroestructura la cual se obtiene a partir del depósito sucesivo de películas de diferentes semiconductores sobre un sustrato de un óxido conductor transparente (TCO por sus siglas en inglés) como se muestra en la figura 2b. Para facilitar la transferencia de los electrones y los huecos entre las interfaces y los contactos se depositan capas intermedias comúnmente llamadas películas tipo buffer, que ayudan a reducir la pérdida de energía mediante el proceso de recombinación, anteriormente descrito. El espesor de una heteroestructura, sin tomar en cuenta el sustrato, es del orden de nanómetros hasta unos pocos micrómetros. Debido al reducido espesor, esta estructura presenta mayor versatilidad de aplicaciones a gran escala, como revestimientos en edificios o sistemas energéticos en áreas remotas, además de una menor cantidad de material activo para fabricar el dispositivo. El rendimiento máximo alcanzado por una celda solar de CdTe fue reportada en junio de 2024 por la compañía First Solar con una eficiencia de 22.6 % mientras que para dispositivos que utilizan CIGS el récord actual es de 23.6% (Green et al., 2024). A pesar de que ambos materiales absorben gran parte del espectro solar, su desempeño aun no iguala con las eficiencias observadas en celdas solares de silicio. Además, el método de fabricación de las películas delgadas usualmente presenta una gran cantidad de defectos, lo que implica pérdida de energía y reducción en la eficiencia. Actualmente se aplican diferentes estrategias con la finalidad de mejorar el desempeño de estos dispositivos, una de las más utilizadas es la incorporación de metales alcalinos a la capa absorbente (Song et al., 2012). A pesar de que las mejoras en la eficiencia son considerables, el rol de estos elementos aun es un tema controversial, siendo la hipótesis principal, la disminución de vías de recombinación de carga (Zhao et al., 2023). Dentro de los retos que afronta esta tecnología es que las películas delgadas son usualmente más susceptibles a la degradación por exposición a la humedad, radiación UV y cambios de temperatura, lo que implica dispositivos con tiempos de vida útil menores comparados con los de primera generación. Además, el uso de materiales tóxicos para el ser humano y el ambiente como el cadmio (Cd), requiere protocolos de seguridad especiales durante su manejo y un sistema de reutilización de los dispositivos al finalizar sus tiempos de vida útil para prevenir contaminación ambiental y riesgos a la salud. A pesar de que las celdas solares de primera y segunda generación son comercializadas actualmente, existen tecnologías emergentes que abordan alternativas más accesibles de fabricación y materiales compatibles con el medio ambiente.

Celdas solares de tercera generación

La principal limitación de las celdas solares de unión pn simple es que su eficiencia de conversión máxima calculada teóricamente es de 33.16 % (Rühle, 2016). El diseño de las celdas solares de tercera generación es una alternativa que está enfocada en alcanzar eficiencias mayores mediante arquitecturas más complejas y la aplicación de nuevos materiales con propiedades mejoradas que facilitan la absorción de energía y su conversión a electricidad, manteniendo costos de fabricación bajos. Entre ellas se encuentran las celdas solares sensibilizadas por colorante (DSSC por sus siglas en inglés), las cuales fueron obtenidas por primera vez en 1991 y consisten en el uso de un colorante como material absorbente, lo cual disminuye los costos de fabricación, ya que estos pueden ser encontrados en hojas, flores, frutas y extraídos por métodos relativamente sencillos (Devadiga et al., 2021). Otra ventaja es que no contienen

materiales tóxicos y presentan biodegradación completa. A pesar de que las DSSC han progresado significativamente en los últimos años, sus eficiencias aún están muy por debajo de las presentadas por los dispositivos de silicio, mostrando un valor récord de 15% obtenido en el año 2020 (Nik Papageorgiou, 27.10.22). Otro grupo perteneciente a esta generación son los dispositivos fotovoltaicos orgánicos (OPV por sus siglas en inglés), los cuales utilizan semiconductores orgánicos como polímeros o moléculas pequeñas como materiales absorbentes de luz. Al igual que las DSSC, el material orgánico se encuentra depositado dentro de una capa mesoporosa de semiconductor, para aumentar la superficie de contacto y mejorar la separación de electrones y huecos, debido a que el transporte de carga en materiales orgánicos es más lento comparado con semiconductores inorgánicos (Figura 3a). En el año 2023 las OPV alcanzaron una eficiencia de 19.31%, reportada por investigadores de la universidad politécnica de Hong Kong (Fu et al., 2023). Recientemente, un nuevo grupo de dispositivos ha captado la atención debido a que combina bajos costos de fabricación con altas eficiencias. Las denominadas celdas solares de perovskita se han convertido en un *hot topic* en la tecnología fotovoltaica debido a que, desde su primera aparición, en 2009 hasta la actualidad, han presentado un desarrollo acelerado, mostrando eficiencias hasta de 26.1% (Green et al., 2024). Este grupo utiliza semiconductores de tipo perovskita los cuales son materiales cuya estructura permite conjugar materiales orgánicos e inorgánicos en un arreglo cubico, Figura 3b. Los materiales tipo perovskita presentan un amplio rango de absorción lo que permite aprovechar gran parte de la energía solar, además, la arquitectura utilizada en su fabricación facilita la separación de los electrones y huecos (Di Zhou et al., 2018). Esta arquitectura consiste en el uso de películas delgadas de semiconductores tipo *p* y *n* que emparedan a la capa absorbente de perovskita, de tal manera que cada vez que un par electrón-hueco es generado, el electrón y el hueco se mueven hacia lados opuestos de la celda solar, evitando recombinarse (Figura 3b). Sin embargo, debido al contenido de plomo y rápida degradación investigaciones más recientes se han enfocado en aumentar los tiempos de vida de los dispositivos de perovskita y reducir su toxicidad (Schileo y Grancini, 2021). Las celdas solares de tercera generación también llamadas tecnologías emergentes han logrado superar ampliamente las eficiencias de conversión de sus antecesoras utilizando diseños que combinan más de una capa de material absorbente de luz, creando así celdas que absorben desde el ultravioleta hasta el infrarrojo. Al tipo de dispositivos que combinan más de una capa de material activo o absorbente de radiación, se les denomina celdas tipo *tándem*. En estas, la idea fundamental es agrupar dos celdas solares en forma de sándwich, con la celda superior capturando radiación UV y la celda inferior capturando la parte del infrarrojo y visible. Dada esta combinación, se han alcanzado eficiencias mayores al límite teórico de las celdas de unión *pn*, con un récord actual de 36.1 % obtenido por una estructura que utiliza silicio como capa absorbente de radiación Infrarroja y una capa de arseniuro de galio como absorbente de radiación UV (Schygulla et al., 2024). A pesar de la complejidad de la fabricación de una celda *tándem*, actualmente se estudian estructuras con un número mayor de celdas apiladas, las cuales permitirían el aprovechamiento de todo el espectro solar (Park et al., 2022).

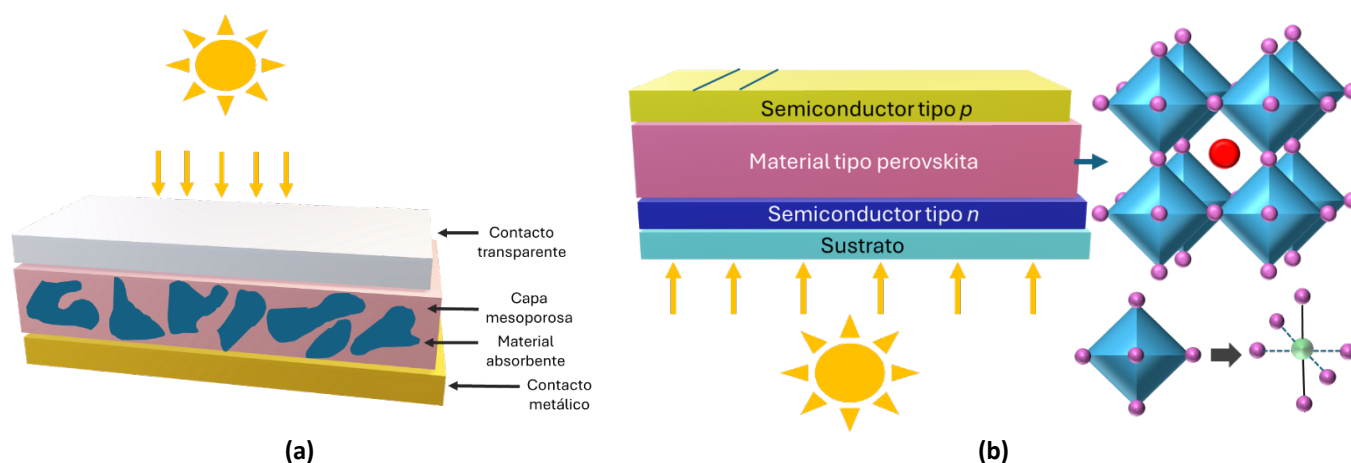


Figura 3. Arquitecturas de celdas solares de tercera generación: (a) Celda solar orgánica, (b) Celda solar de perovskita con la ilustración de la estructura cúbica.

Conclusión

En este escrito se describieron las características fundamentales de las tres diferentes generaciones de celdas solares, así como los principales representantes de cada una. Es claro que la tecnología fotovoltaica se encuentra en constante

evolución, desde la primera generación, basada en el silicio cristalino, hasta las tecnologías emergentes como las celdas solares de perovskita. El conjunto de todas las generaciones presenta retos que incentivan su investigación, donde uno de los principales consiste en hacer la tecnología fotovoltaica accesible para el grueso de la población. A pesar de que las primeras generaciones dominan el mercado actual de celdas solares, el gran desarrollo observado en las tecnologías emergentes apunta a que estos materiales disputaran la supremacía comercial de sus predecesoras, debido a sus menores costos de producción y altas eficiencias; aunque es evidente que hace falta una mayor investigación con miras en aumentar los tiempos de vida operacionales de estos dispositivos. Con los avances presentados por cada generación se refuerza la posición de la tecnología fotovoltaica como una alternativa cada vez más factible para sustituir el uso de los combustibles fósiles en los próximos años y así paliar los efectos del cambio climático, sin que ello implique sacrificar el desarrollo social.

Agradecimientos y financiamiento: Gabriela S. Anaya-González agradece al CONAHCYT por el financiamiento otorgado a través de la beca con número 660915 para la realización de una estancia posdoctoral. Los autores agradecen a la UNAM por el financiamiento otorgado mediante los programas PAIP 5000- 9190 y PAPIIT IA208621 a través de los cuales es posible realizar la investigación en este campo.

Bibliografía

- Ballif, C., Haug, F.-J., Boccard, M., Verlinden, P. J. y Hahn, G. (2022). Author Correction: Status and perspectives of crystalline silicon photovoltaics in research and industry. *Nature Reviews Materials*, 7(11), 926. <https://doi.org/10.1038/s41578-022-00510-4>.
- Beatriz Santos. (2022). IEA-PVPS expects polysilicon prices to stabilize by end of 2023. <https://www.pv-magazine.com/2022/10/17/iea-pvps-expects-polysilicon-prices-to-stabilize-by-end-of-2023/>.
- Best Research-Cell Efficiency Chart. (2024, 18 de septiembre). <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html/>.
- Devadiga, D., Selvakumar, M., Shetty, P. y Santosh, M. S. (2021). Dye-Sensitized Solar Cell for Indoor Applications: A Mini-Review. *Journal of Electronic Materials*, 50(6), 3187–3206. <https://doi.org/10.1007/s11664-021-08854-3>.
- Di Zhou, Zhou, T., Tian, Y., Zhu, X. y Tu, Y. (2018). Perovskite-Based Solar Cells: Materials, Methods, and Future Perspectives. *Journal of Nanomaterials*, 2018, 1–15. <https://doi.org/10.1155/2018/8148072>.
- Dubey, S., Jadhav, N. Y. y Zakirova, B. (2013). Socio-Economic and Environmental Impacts of Silicon Based Photovoltaic (PV) Technologies. *Energy Procedia*, 33, 322–334. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.05.073>.
- Fu, J., Fong, P. W. K., Liu, H., Huang, C.-S., Lu, X., Lu, S., Abdelsamie, M., Kodalle, T., Sutter-Fella, C. M., Yang, Y. y Li, G. (2023). 19.31% binary organic solar cell and low non-radiative recombination enabled by non-monotonic intermediate state transition. *Nature Communications*, 14(1), 1760. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37526-5>.
- Green, M. A., Dunlop, E. D., Yoshita, M., Kopidakis, N., Bothe, K., Siefert, G., Hinken, D., Rauer, M., Hohl-Ebinger, J. y Hao, X. (2024). Solar cell efficiency tables (Version 64). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 32(7), 425–441. <https://doi.org/10.1002/ppp.3831>.
- Lee, Y., Park, C., Balaji, N., Lee, Y.-J. y Dao, V. A. (2015). High-efficiency Silicon Solar Cells: A Review. *Israel Journal of Chemistry*, 55(10), 1050–1063. <https://doi.org/10.1002/ijch.201400210>.
- Manzoor, S., Filipič, M., Onno, A., Topič, M. y Holman, Z. C. (2020). Visualizing light trapping within textured silicon solar cells. *Journal of Applied Physics*, 127(6), Artículo 063104. <https://doi.org/10.1063/1.5131173>.
- Mondragón, F. (2021). Ciclos del dióxido de carbono en la formación y utilización de combustibles fósiles y su efecto en el cambio climático. *Revista De La Academia Colombiana De Ciencias Exactas, Físicas Y Naturales*. Publicación en línea avanzada. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1364>.
- Nik Papageorgiou (27.10.22). "Grätzel" solar cells achieve a new record. <https://actu.epfl.ch/news/gratzel-solar-cells-achieve-a-new-record/>.
- Oh, W., Bae, S., Kim, S., Park, N., Chan, S.-I., Choi, H., Hwang, H. y Kim, D. (2019). Analysis of degradation in 25-year-old field-aged crystalline silicon solar cells. *Microelectronics Reliability*, 100–101, 113392. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2019.06.084>.
- Park, Y., Zhao, B. y Fan, S. (2022). Reaching the Ultimate Efficiency of Solar Energy Harvesting with a Nonreciprocal Multijunction Solar Cell. *Nano Letters*, 22(1), 448–452. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.1c04288>.
- Rühle, S. (2016). Tabulated values of the Shockley–Queisser limit for single junction solar cells. *Solar Energy*, 130, 139–147. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.02.015>.
- Schileo, G. y Grancini, G. (2021). Lead or no lead? Availability, toxicity, sustainability and environmental impact of lead-free perovskite solar cells. *Journal of Materials Chemistry C*, 9(1), 67–76. <https://doi.org/10.1039/D0TC04552G>.
- Schygulla, P., Müller, R., Höhn, O., Schachtner, M., Chojniak, D., Cordaro, A., Tabernig, S., Bläsi, B., Polman, A., Siefert, G., Lackner, D. y Dimroth, F. (2024). Wafer-bonded two-terminal III-V/Si triple-junction solar cell with power conversion efficiency of 36.1% at AM1.5g. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 3769. Publicación en línea avanzada. <https://doi.org/10.1002/ppp.3769>.
- Sena, S. (2021, 26 de abril). Monocrystalline Solar Cell and its efficiency. *SolarSena*. <https://solarsena.com/monocrystalline-solar-cells-explained/>.
- Song, X., Caballero, R., Félix, R., Gerlach, D., Kaufmann, C. A., Schock, H.-W., Wilks, R. G. y Bär, M. (2012). Na incorporation into Cu(In,Ga)Se₂ thin-film solar cell absorbers deposited on polyimide: Impact on the chemical and electronic surface structure. *Journal of Applied Physics*, 111(3), Artículo 034903. <https://doi.org/10.1063/1.3679604>.
- Zhao, C., Yu, S., Tang, W., Yuan, X., Zhou, H., Qi, T., Zheng, X., de Ning, Ma, M., Zhu, J., Zhang, J., Yang, C. y Li, W. (2023). Advances in CIGS thin film solar cells with emphasis on the alkali element post-deposition treatment. *Materials Reports: Energy*, 3(3), 100214. <https://doi.org/10.1016/j.matre.2023.100214>.