

CELIDAS SOLARES DE PEROVSKITA COMO ALTERNATIVA

para la electrificación rural del Perú

Perovskite solar cells as an alternative for rural electrification in Peru

Vanessa Martínez Rojas¹

vanessa.mrojas19@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2295-9610>

RECIBIDO [28/01/2021]

ACEPTADO [03/03/2021]

PUBLICADO [30/04/2021]



Renzo Seminario Córdova²

rseminario@alumni.unav.es

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6992-5990>

Pág. 42-50

¹ Maestra en Ciencias con mención en Energías Renovables y Eficiencia Energética por la Universidad Nacional de Ingeniería. Investigadora en Innova Scientific SAC.

² Magíster en Biodiversidad, paisaje y gestión sostenible por la Universidad de Navarra, España. Gerente de Innovación y Desarrollo (Innova Scientific SAC).

RESUMEN

En este artículo se muestran algunas características de celdas solares hechas a base de perovskita —la llamada “tecnología fotovoltaica del futuro”—; entre ellas, su alta eficiencia, bajo costo, fácil elaboración y gran versatilidad. Asimismo, se busca hacer un panorama de la situación, pues, ya que el Perú ha sido favorecido con abundante energía solar, es necesario encontrar la manera de aprovechar este beneficio incursionando en el desarrollo de la mencionada tecnología. Además, el país cuenta con experiencia previa al respecto, ya que existen grupos de investigación que vienen estudiando esta tecnología desde hace algunos años. Asimismo, esto puede proyectarse como alternativa tecnológica para zonas rurales remotas que no cuenten con conexión a ninguna red eléctrica.



Palabras clave

Celdas Solares, Perovskita,
Energía Solar, Zonas Rurales,
Red Eléctrica



ABSTRACT

This article shows some characteristics of perovskite-based solar cells -the so-called “photovoltaic technology of the future”-; among them, their high efficiency, low cost, easy production and great versatility. We also seek to provide an overview of the situation, since Peru has been favored with abundant solar energy, it is necessary to find a way to take advantage of this benefit by venturing into the development of the aforementioned technology. In addition, the country has previous experience in this regard, since there are research groups that have been studying this technology for some years. Likewise, this can be projected as a technological alternative for remote rural areas that do not have connection to any electrical grid.



Keywords

Solar Cells, Perovskite,
Solar Energy, Rural Areas,
Electricity Grid



INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la aparición de las celdas solares a base de perovskita o *perovskite solar cells* (por sus siglas en inglés, PSC), ha captado la atención de numerosos grupos de investigación. Las PSC han quintuplicado su eficiencia en solo ocho años, logrando una impresionante duplicación de la eficiencia en los últimos cinco años; actualmente, este material ostenta la ef-

ciencia récord de 25.5 % (The National Renewable Energy Laboratory-NREL, 2021), comparable con las celdas solares de silicio cristalino, como se observa en la Tabla 1, aunque estas últimas han tardado 40 años en conseguir similar eficiencia. Asimismo, la rápida evolución de eficiencia de conversión de energía de las PSC la convierte en una alternativa prometedora para la producción futura de energía eléctrica.

Tabla 1.
Eficiencia certificada de celdas solares de silicio y de las PSC

Material	Eficiencia (%)	Área (cm ²)
Silicio cristalino	26,0 ± 0,5	4,02
Silicio amorfo	10,2 ± 0,3	1,00
Perovskita (película delgada)	25,5 ± 0,8	0,09

Nota. Tabla muestra los resultados de celdas elaboradas en laboratorio. Adaptado de Green et al., (2020)



Junto a la alta eficiencia obtenida hasta el momento, existen otras ventajas que poseen las PSC, las cuales las convertirían en celdas bastante competitivas frente a las celdas de silicio cristalino (c-Si), entre ellas, su fácil procedimiento de preparación, su versatilidad de componentes y la flexibilidad de su tecnología (Park, 2015); sin embargo, estas celdas aún presentan problemas de estabilidad frente a la temperatura y humedad (Manshor et al., 2016), los cuales presentan limitantes sobre las condiciones en las que podrían trabajar las PSC. Por ello, muchas universidades y empresas dedican esfuerzos notables en resolver estas limitantes; incluso, desde hace más de diez años en el Perú se viene desarrollando la fabricación de celdas solares de tercera generación, específicamente en la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería, que inició con la fabricación de celdas solares sensibilizadas (Martínez et al., 2016) y, actualmente, con las PSC (Martínez, 2019).

MARCO TEÓRICO

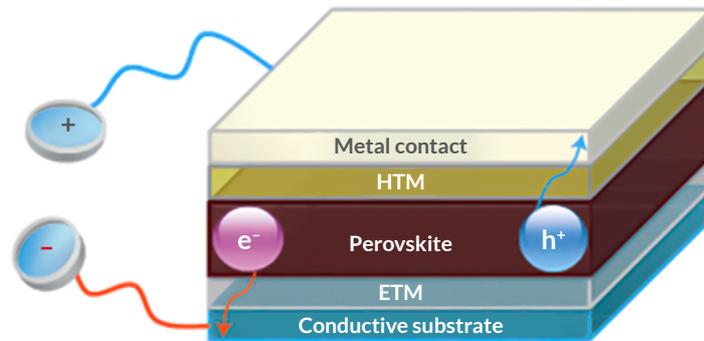
Para un mayor entendimiento del tema, se describe el término perovskita, que se refiere a la estructura cristalina del titanato de calcio (CaTiO_3), que fue descubierta en 1839 por el geólogo alemán Gustav Rose y recibió el nombre de “perovskita” en homenaje al mineralogista ruso Lev Perovski, quien fue el primero en caracterizar este material. Desde entonces, se dice que son perovskitas todos los compuestos con la misma estructura cristalina que el titanato de calcio. Fue en 2009 que se probó este material como aplicación para fabricar celdas solares, donde el perovskita es la capa más importante en el proceso de absorción de la radiación.

A continuación, se describe el principio de funcionamiento de las PSC. Estas consisten

principalmente de un sustrato conductor (vidrio de óxido de estaño dopado con flúor, por ejemplo), un material de transporte de electrones (ETM, por sus siglas en inglés), el perovskita, un material de transporte de huecos (HTM, por sus siglas en inglés) y un contacto metálico.

Como se observa en la Figura 1, se recubre un material de transporte de electrones (ETM, como TiO_2 nanoestructurado) sobre un sustrato conductor, y una capa fotoactiva de perovskita (típicamente $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$) es revestida por *spin coating* sobre el ETM. Otra capa de material de transporte de agujeros (HTM) es luego recubierta por *spin coating* sobre el perovskita y, posteriormente, se deposita una película delgada de metal, que sirve como contacto. Bajo iluminación con luz, el material perovskita crea la separación de la carga, de esa manera, los electrones se mueven al sustrato conductor a través del ETM y los agujeros se mueven al contacto del metal a través del HTM. Esos electrones y agujeros generados por la luz pueden realizar trabajo y generar electricidad a través de un circuito externo. Este arreglo facilita el transporte de los huecos de la capa superior (contacto metálico), que consiste en un material buen conductor de cargas, generalmente de oro o plata.

Figura 1.
Representación esquemática de celdas solares de perovskita.

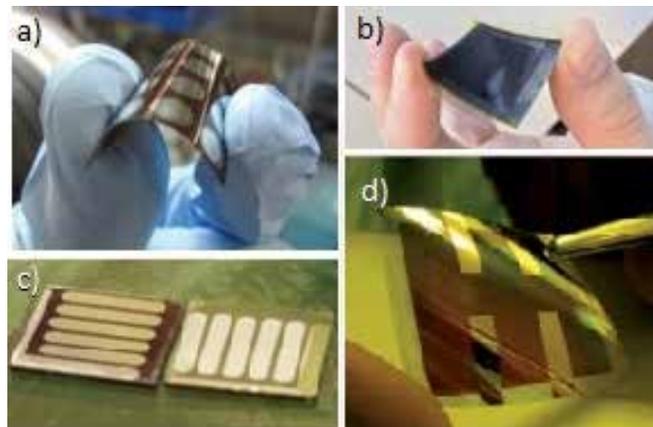


Nota. Ilustración representativa de la estructura general y del principio de funcionamiento de las PSC. HTM: material de transporte de agujeros; ETM: material de transporte de electrones. Tomado de Sun (2015)

Existen diversas presentaciones de las PSC, dos de las más conocidas son las que suelen depositarse sobre una estructura flexible y

las de estructura rígida, que suelen depositarse sobre un sustrato de vidrio. En la Figura 2 se muestran fotografías de estas celdas.

Figura 2.
Fotografías de PSC de película delgada flexible y PSC de estructura rígida



Nota. a), b) y d) muestran diferentes PSC de película delgada flexible; c) muestra dos PSC de estructura rígida. Adaptado de Mason (2015)

Las PSC, como toda nueva tecnología, presentan retos que superar. Uno de ellos es la estabilidad. Aunque las PSC han reportado datos de estabilidad de hasta unos miles de horas (Grancini et al., 2018) de poco más de un año, la estabilidad a largo plazo, que

es comparable al estándar comercial de 30 años, aún no se ha demostrado. Ambientes severos como, por ejemplo, tratamiento térmico, iluminación de luz, humedad, etc., parecen ser el cuello de botella que impiden su comercialización. Entre ellos, la humedad

es una de las posibles causas de la degradación de perovskita. Sin embargo, se han reportado varios estudios y técnicas que han superado este inconveniente. Por ejemplo, mediante el uso de una capa resistente a la humedad (por ejemplo, nanotubos de carbono o grafito) para evitar la entrada de agua (Mei et al., 2014), se mejoró la estabilidad de los dispositivos fotovoltaicos de perovskita en condiciones de alta humedad y temperatura. También se han utilizado técnicas de encapsulación que usan sellado de vidrio o películas plásticas laminadas para mejorar la estabilidad del dispositivo a más de 3000 horas a 60 °C bajo luz solar simulada. Además, cuando se incorporan iones en perovskita, la resistividad térmica y a la humedad mejora drásticamente. Estos resultados indican que los módulos FV de perovskita, con una composición y encapsulación apropiadas, tienen el potencial de ser estables (Song et al., 2016).

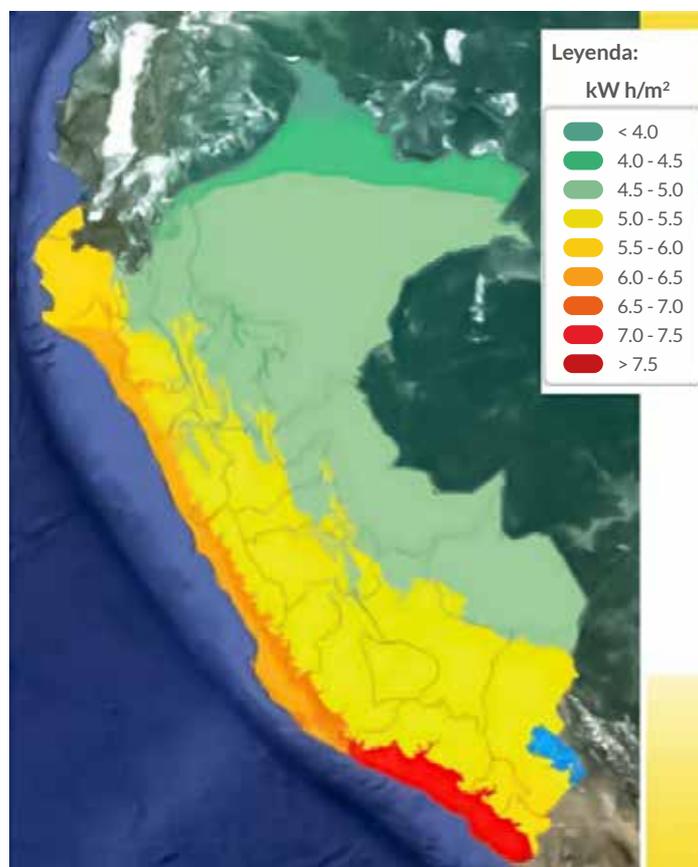
Otro tema que generó muchas dudas en la sociedad ha sido la presencia de plomo en las PSC, cayendo en la idea que son nocivas para el medio ambiente. Sin embargo, la tecnología de perovskita se considera la tecnología FV más respetuosa con el medio ambiente, debido, entre otras cosas, al uso de material sintético (que no requiere minería o procesos de purificación complejos), la cantidad muy pequeña de material requerido y los procesos usan bajas temperaturas. Las mejores eficiencias se logran hoy en día con celdas de perovskita que contienen plomo. Se están considerando alternativas, pero no obtienen un valor muy bueno por el momento. La cantidad de plomo en las celdas es muy baja: las capas que contienen plomo en una celda de perovskita tienen típicamente alrededor de 0,3 μm de espesor, lo que se traduce en 1 g de yoduro de plomo/ m^2 . Esto se encuentra de acuerdo con la directiva de restricción de sustancias peligrosas (RoHS por sus siglas en inglés). Además,

se están buscando soluciones para minimizar aún más la posibilidad muy pequeña de que el plomo termine en el medio ambiente, como resultado de daños en la celda FV. Por ejemplo, los materiales se pueden integrar en la celda que se une al plomo en caso de exposición y forman componentes insolubles en agua (Aernouts, 2019).

En este sentido, hay mucho optimismo; varios líderes de investigación indican que las PSC, específicamente las celdas tándem con silicio o celdas de película delgada para aplicaciones integradas, llegarán pronto al mercado. Y tanto la comunidad de I + D como la industria fotovoltaica (FV) desempeñarán un papel importante para que esto sea un éxito, al mejorar aún más la eficiencia y la estabilidad, así como al encontrar nuevos modelos comerciales para ingresar a nuevos mercados con automóviles, elementos de construcción, ropa y más, basados en energía solar. Se avizora un futuro prometedor para la industria FV (Aernouts, 2019).

Además, el Perú cuenta con un gran privilegio en relación con la disponibilidad de la energía solar, como se muestra en la Figura 3. En esta se observa que, en casi todo el territorio, en particular en los Andes, el promedio de radiación solar mensual es alto durante todo el año, siendo el promedio mensual en la mayor parte del país de $5 \pm 1 \text{ kWh/m}^2 \text{ día}$, lo que sugiere que en estas zonas sería bastante aprovechable este recurso y viable la implementación de las PSC.

Figura 3.
Mapa de la energía solar incidente en el Perú durante enero



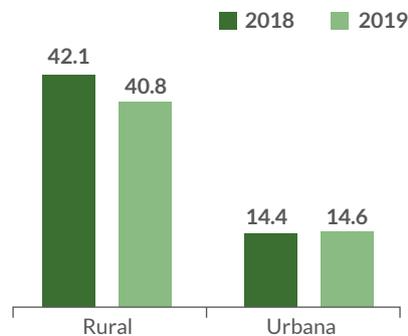
Nota. Tomado Senamhi (2003)

Por otro lado, se tiene que 10,6 millones de habitantes viven en la sierra, de los cuales un 60 % lo hacen en zonas rurales. De entre ellos, las comunidades indígenas representan una amplia mayoría. Quechuas y aymaras comparten condiciones similares de vida, ya que en su mayor parte son pobres, dependen de la agricultura de subsistencia y viven en una situación vulnerable, a menudo condicionada por la dificultad de acceso a servicios básicos y mercados (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2017).

En este sentido, se puede identificar esta distribución de pobreza. Perú cuenta con

una extensión de 1 285 216 km², y el año pasado se estimó una población de 32 millones 626 mil habitantes (Instituto Nacional de Estadística e Informática [INEI], 2020); además, se tiene que 96,4 % es el promedio nacional de coeficiente de electrificación (Ministerio de Energía y Minas [Minem], 2015); sin embargo, hay un problema grande de desigualdad entre áreas urbanas y rurales, de modo que las zonas rurales han concentrado en los últimos años marcadamente los mayores índices de pobreza (INEI, 2020), como se observa en la Figura 4.

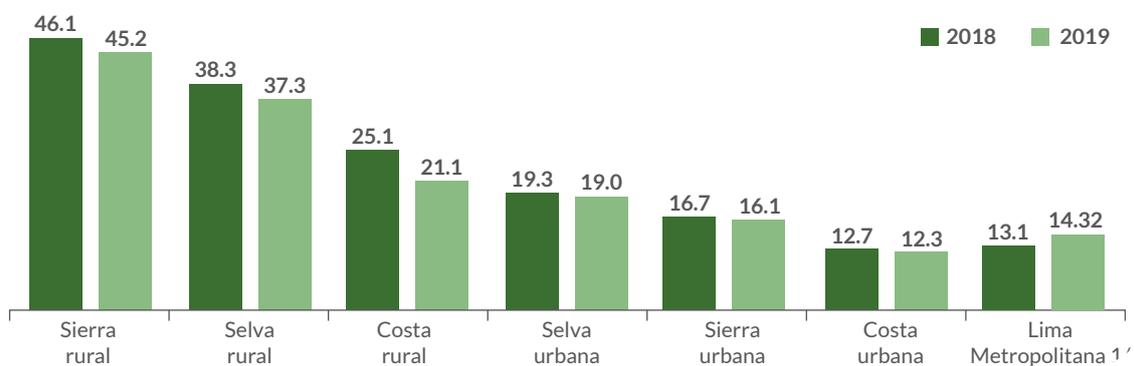
Figura 4.
Pobreza según el área de residencia, 2017-2018



Nota. Tomado Carhuavilca (2020)

Y esta desigualdad se repite si se analiza por dominios geográficos, como se observa en la Figura 5.

Figura 5.
Pobreza según dominios geográficos, 2017-2018



Nota. Tomado de Carhuavilca (2020)

Por tanto, se tiene que, el costo de conectar una familia rural a la red eléctrica supera en muchos casos los US 1800 (Horn y Novoa, 2009), costo superior al de un sistema fotovoltaico domiciliario, SFD (Minem, 2007). Así, la única forma de suministrar electricidad en forma económicamente viable a mu-

chas regiones es mediante generación local con base en energías renovables, preferiblemente de energía hidráulica o eólica. Existen estos recursos localmente, pero en la mayoría de los casos, la única solución viable son los paneles fotovoltaicos.

CONCLUSIONES

Se recomienda atender la necesidad energética de diversas zonas del país, aprovechando el recurso de la energía solar, y así promover su desarrollo, especialmente en zonas rurales, las cuales evidencian mayores índices de pobreza, ya que el acceso a la electricidad está siempre asociado a la mejora de las condiciones de vida. En este sentido, las PSC se presentan como una solución al requerimiento energético latente en las zonas remotas, que aún no cuentan con ninguna conexión a la red eléctrica. Además, podrían fabricarse en el país, como una gran alternativa a fuentes convencionales de energía y, en un futuro no muy lejano, aportar en el suministro energético del país.

REFERENCIAS

- Aernouts, T. (2019, 14 de noviembre). 5 Things to Know about Perovskite Solar Cells. SPIE *The International Society for Optics and Photonics*. <https://spie.org/news/5-things-to-know-about-perovskite-solar-cells?SSO=1>
- Carhuavilca, D., (2020). *Resultados de la pobreza monetaria 2019*. Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI).
- Grancini, G., Roldán-Carmona, C., Zimmermann, I., Mosconi, E., Lee, X., Martineau, D., Nabey, S., Oswald, F., De Angelis, F., Graetzel M. & Nazeeruddin, M. (2017). One-Year stable perovskite solar cells by 2D/3D interface engineering *Nature Communications*, 8(15684), 1-8. <https://www.nature.com/articles/ncomms15684>
- Green, M., Dunlop, E., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., Kopidakis, N. & Hao, X. (2020). Solar cell efficiency tables (version 57). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 25(7). <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/pip.3371>
- Horn, M. y Novoa, A. (2009). *Matriz energética en el Perú y contribución de las energías renovables*. Fundación Friedrich Ebert Stiftung.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2020). *Estado de la población peruana 2020*. (INEI).
- Manshor, N., Wali, Q., Wong, K., Muzakir, S., Fakharuddin, A., Schmidt-Mende, L. & Jose, R. (2016). Humidity versus photo-stability of metal halide perovskite films in a polymer matrix. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 18(31), 21629-21639. <https://pubs.rsc.org/en/content/article-landing/2016/cp/c6cp03600g#!divAbstract>
- Martínez, V. (2019). Preparation of highly efficient carbon-based perovskite solar cells (C-based PSCs) by screen printing. *SPIE* 11094. <https://bit.ly/3gNJ92t>
- Martínez, V., López, A. y Gómez, M. (2016), Celdas solares sensibilizadas por colorante basadas en TiO₂ modificado con CuO. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 82(3), 324-338. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2016000300008
- Mason, S. (2015). Next-generation perovskite solar cells made stable by metal oxide 'sandwich'. *Newsroom*. <https://newsroom.ucla.edu/releases/next-generation-perovskite-solar-cells-made-stable-by-metal-oxide-sandwich>
- Mei, A., Li, X., Liu, L., Ku, Z., Liu, T., Rong, Y., Xu, M., Hu, M., Chen, J., Yang, Y., Grätzel, M. & Han, H. (2014). A hole-conductor-free fully printable mesoscopic perovskite solar cell with high stability. *Science*, 345(6194), 295-299. <https://science.sciencemag.org/content/345/6194/295.full>
- Ministerio de Energía y Minas. (2007). *Guía de Instalación de Sistemas Fotovoltaicos Domésticos (SFD)*. Minem.



Ministerio de Energía y Minas. (2015). *Plan Nacional de Electrificación Rural Periodo 2016-2025*. Minem.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2017, 31 de mayo). *Una iniciativa eficaz para el desarrollo rural en las zonas altas de Perú*. FAO. <http://www.fao.org/in-action/agronoticias/detail/es/c/890729/>

Park, N. (2015). Perovskite solar cells: an emerging photovoltaic technology. *Materials Today*, 18(2), 65-72. <https://bit.ly/3gKPxri>

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2003). *Atlas de energía solar del Perú*. SENAMHI

Song, Z., Watthage, S., Phillips, A. & Heben, H., (2016). Pathways toward high-performance perovskite solar cells: review of recent advances in organo-metal halide perovskites for photovoltaic applications. *Journal of Photonics for Energy*, 6(2), 1-23. <https://bit.ly/3gOXiMY>

Sun, L. (2015). Perovskite solar cells: Crystal crosslinking. *Nature Chemistry*, 7(9). <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26291936/>

The National Renewable Energy Laboratory. (2021). *Best Research-Cell Efficiencies*. NREL. <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>

Ye, M. (2016). Recent advancements in perovskite solar cells: Flexibility, stability and large scale. *Journal of Materials Chemistry A*, 4(18). <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2016/ta/c5ta09661h#!divAbstract>