

MEJORES PRÁCTICAS PARA MITIGAR EL IMPACTO SOCIO-AMBIENTAL DE LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS INTERCONECTADOS

*BEST PRACTICES TO MITIGATE SOCIO-ENVIRONMENTAL IMPACT OF
GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC SYSTEMS*

Luis López Martinelli ¹, Fabio Manzini Poli ²

Recibido: 18/10/2021 y Aceptado: 29/11/2021
ENERLAC. Volumen VI. Número 1. Junio, 2022 (8 - 20)
ISSN: 2602-8042 (impreso) / 2631-2522 (digital)



Foto de Derek Sutton de Unsplash.

1 Universidad Nacional Autónoma de México. México.

luisl@ualberta.net

<https://orcid.org/0000-0002-6963-4605>

2 Universidad Nacional Autónoma de México. México.

fmp@ier.unam.mx

<https://orcid.org/0000-0002-6957-7970>



RESUMEN

Durante su ciclo de vida, los Sistemas Fotovoltaicos Interconectados (SFVI) generan impactos socio-ambientales. Estos impactos ocurren principalmente durante la extracción de los insumos para su fabricación y en su fabricación misma, pero también durante su instalación, operación y desmantelamiento. El presente artículo identifica algunas mejores prácticas disponibles actualmente para la disminución sustancial del impacto socio-ambiental de un SFVI a través de una revisión de literatura. La extensión de la vida útil de los SFVI y la selección de componentes específicos disponibles en la actualidad, disminuyen sustancialmente el impacto socio-ambiental de los SFVI. Mitigar oportunamente los impactos socio-ambientales de los SFVI propicia un crecimiento más sustentable de la tecnología, respetuoso de los límites planetarios y ecosistemas, y permite disminuir las afectaciones secundarias que repercuten en resistencias a su difusión.

Palabras clave: Energía fotovoltaica, Impacto socio-ambiental, paneles fotovoltaicos (FV), Sistemas Fotovoltaicos Interconectados (SFVI), Evaluación de Impacto social, Evaluación de Impacto ambiental.

ABSTRACT

During their life cycle, Grid-connected Photovoltaic Systems (GCPVS) cause socio-environmental impacts. These impacts occur mainly in the raw material extraction for their manufacture, in the manufacture itself, and during their installation, operation, and dismantling. This article identifies some currently available best practices for substantially reducing the socio-environmental impact of an GCPVS through a literature review. The extension of the lifespan of the GCPVS and the selection of specific components available today effectively reduce the socio-environmental impacts of the GCPVS. The timely mitigation of the socio-environmental impacts of GCPVS promotes a sustainable growth of the technology, respectful of planetary limits and ecosystems, and reduces the secondary effects that create resistance to its diffusion.

Keywords: *Photovoltaic energy, Socio-environmental Impact, Photovoltaic Modules (PV), Grid-connected photovoltaic systems (GCPV), Social Impact Assessment, Environmental Impact Assessment.*

Existe resistencia a la difusión de la energía fotovoltaica debido a su impacto socio-ambiental, particularmente el causado por sus residuos al término de su vida útil.

INTRODUCCIÓN Y METODOLOGÍA

La energía fotovoltaica (FV) goza de una percepción generalizada de ser una tecnología limpia. De acuerdo al Laboratorio de Energías Renovables de Estados Unidos (NREL, por sus siglas en inglés), el impacto ambiental cuantificado mediante la metodología del ciclo de vida armonizado de la energía fotovoltaica es al menos un orden de magnitud menor al del gas natural en ciclo combinado (2021). Sin menoscabo, en algunos sectores de la sociedad existe resistencia a la difusión de la energía fotovoltaica debido a su impacto socio-ambiental, particularmente el causado por sus residuos al término de su vida útil.

Desde hace algunas décadas, el análisis de ciclo de vida (ACV) de la tecnología FV ha sido sujeto de estudio. En el 2014, Nugent y Sovacool ya identificaban 153 estudios ACV de la tecnología fotovoltaica, y apuntaban a que la fase de extracción y fabricación era responsable del 79% de la huella climática de los SFVI (2014). En adición a la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), “los módulos fotovoltaicos contienen metales pesados tales como plomo y cadmio, que pueden ser peligrosos cuando los paneles son desmantelados... y los paneles hechos con celdas tipo película delgada contienen materiales tóxicos como el galio, el indio y el arsénico” (Vandeligt et al 2012, citado en Olowu et al., 2018). Durante su fabricación, como en el resto de la industria de semiconductores, para purificar el semiconductor se utilizan compuestos químicos peligrosos tales como el “ácido clorhídrico, fluoruro de hidrógeno, ácido nítrico, acetona, 1,1,1-tricloroetano y ácido sul-fúrico” (Olowu et al., 2018, p. 10). Por otro lado, existen reportes de trabajo forzado en el proceso de purificación del silicio en la región de Xinjiang Uyghur en China (Braw, 2021; Murphy & Elima, 2021), donde se produce el 45% del suministro de silicio policristalino de grado solar del mundo (Murphy & Elima, 2021), por lo que, de acuerdo a Chase y Bernreuter es altamente

probable que cualquier módulo solar tenga silicio de Xinjiang (2021, citados en Hernández-Morales et al., 2021).

La Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA, por sus siglas en inglés) estima que habrá 78 millones de toneladas de residuos fotovoltaicos al 2050 (Weckend et al., 2016). Los países industrializados, como Inglaterra, Australia, Japón y la Unión Europea, ya han implementado regulación específica para el manejo de estos residuos y cuentan con plantas de reciclaje dedicadas. Éste no es el caso generalizado en países del sur global donde con frecuencia no se cuenta con legislación específica o plantas de reciclaje para los residuos fotovoltaicos. Éstos contienen un porcentaje elevado de materiales que pueden ser reutilizados, así como materiales tóxicos que pueden contaminar el medio ambiente con una disposición final inadecuada (Mahmud et al., 2018).

A nivel mundial, los diversos esfuerzos para el reciclaje de los residuos de un SFVI, son comúnmente impulsados por legislación local o asociaciones de empresas solares cuyo enfoque suele ser el “desarrollo de métodos de reciclaje eficientes y costo-efectivos, más que la protección del medio ambiente” (Rabaia et al., 2021, p. 11). Desde la academia, Mahmoudi et al. realizaron una revisión de 70 estudios enfocados en el término de vida de los módulos FV, la mayoría de ellos con énfasis en el reciclaje y la recuperación de materiales (2019). Existen también esfuerzos para extender la vida útil de los paneles FV recuperándolos al término de su primer uso (Create New Revenue Streams, s/f).

A partir de un análisis de literatura, es posible identificar el impacto ambiental en los límites planetarios y ecosistemas, así como el impacto social en la calidad de vida y salud humana, de los diferentes tipos de componentes, tecnologías y prácticas de disposición, creando la posibilidad de reducir el impacto a través de la selección específica de ciertos componentes y prácticas actualmente disponibles (Mahmud et al., 2018).

Con ello, buscar que las mejores prácticas permeen en la industria para que se vuelvan un instrumento de decisión en la implementación de la tecnología FV, y así propiciar un crecimiento más sustentable de la tecnología, respetuoso de los límites planetarios y ecosistemas (Steffen et al., 2015), disminuyendo las afectaciones secundarias que repercuten en resistencias a su difusión.

DESARROLLO Y RESULTADOS: IDENTIFICACIÓN DE MEJORES PRÁCTICAS

Extracción y fabricación

Como el proceso de extracción y purificación de los materiales para la fabricación de los módulos FV es intensivo energéticamente hablando, la energía utilizada en la manufactura de los módulos es uno de los determinantes más importantes de su huella de carbón. Las regiones con menor participación de fuentes fósiles y menor factor de emisiones en su red eléctrica, por ende, producen módulos fotovoltaicos con menor huella de carbono (Liu & van den Bergh, 2020). Debido al gran porcentaje de aportación de las carboeléctricas en la red eléctrica de China (Liu & van den Bergh, 2020), “la huella de carbono resultante de la manufactura de paneles solares en China es del doble que de los paneles fabricados en Europa” (Olowu et al., 2018). En el caso de Xinjiang, el 75% de la energía es aportada por fuentes fósiles, de las cuales el carbón es la fuente mayoritaria (Overton, 2016). Por otro lado, los reportes de trabajo forzado en Xinjiang, la utilización de metales pesados y químicos peligrosos que requiere de un elevado estándar de seguridad para los trabajadores, y la negativa del gobierno a permitir auditorías externas, apuntan a favorecer el suministro desde otras regiones (Braw, 2021; 2021, citados en Hernández-Morales et al., 2021). En este sentido, Murphy y Elima (2021) proponen algunas fuentes de suministro alterno.

Otra forma de reducir las emisiones relacionadas con la purificación del silicio es a través del uso de silicio semiconductor reciclado. Klugmann-Radziemska y Kuczyńska-Łażewska estiman que esto logra una reducción de la huella de carbono de un 42% y una reducción casi 50% mayor en el impacto ambiental total, “principalmente debido a la reducción del consumo de energía durante la producción de silicio cristalino de alta pureza” (2020, p. 1). Por su parte, Shin et al. indican que los módulos FV fabricados con silicio reciclado tienen una eficiencia similar a los fabricados con silicio virgen (2017, citado en Mahmoudi et al., 2019).

Si bien el impacto socio-ambiental de un SFVI proviene principalmente de los paneles FV, el resto de los componentes también tienen un impacto en la extracción y fabricación. Tales como los procesos de extracción mineral y fabricación para el cableado de cobre, estructura de montaje de aluminio y baterías para los SFVI con almacenamiento. La reducción de estos impactos se aborda en la siguiente sección.

A partir de esta información es posible concluir que el origen de los módulos FV, particularmente la mezcla de combustibles que se utiliza

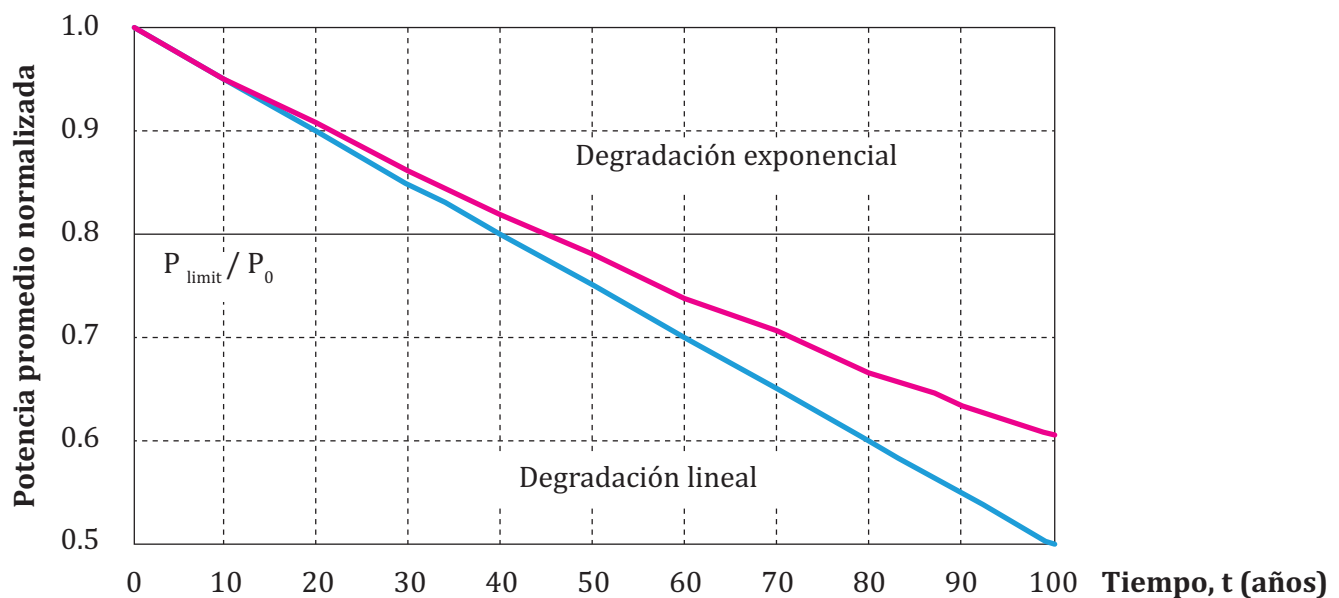
en su fabricación y el uso de silicio reciclado, incide significativamente en el impacto ambiental. Con respecto al impacto social, es preferible favorecer el suministro desde regiones con un récord transparente en sus prácticas laborales.

Diseño, instalación, operación y mantenimiento

Los estándares y prácticas de fabricación han ido evolucionando con el tiempo, logrando en conjunto implementaciones de mayor calidad. De forma ilustrativa, los paneles FV presentaban 5 veces menos fracaso de acreditación bajo las normas IEC en el 2012 en comparación con el 2002 (Köntges et al., 2014, p. 7). Los paneles fotovoltaicos son el elemento de mayor confiabilidad de los SFVI, por lo que con frecuencia son acompañados por amplias garantías que cubren hasta 30 años de desempeño (Brakels, 2019).

Estas garantías están diseñadas a partir de curvas de degradación natural, como la que se muestra en la Figura 1 considerando una degradación anual inicial del 0.5%, en donde se observa que a los 40 años la potencia se reduce un 20% (en relación a su potencia inicial P_0) si se considera una degradación lineal y un 17% si se considera una degradación exponencial.

Figura 1. Curvas de degradación.

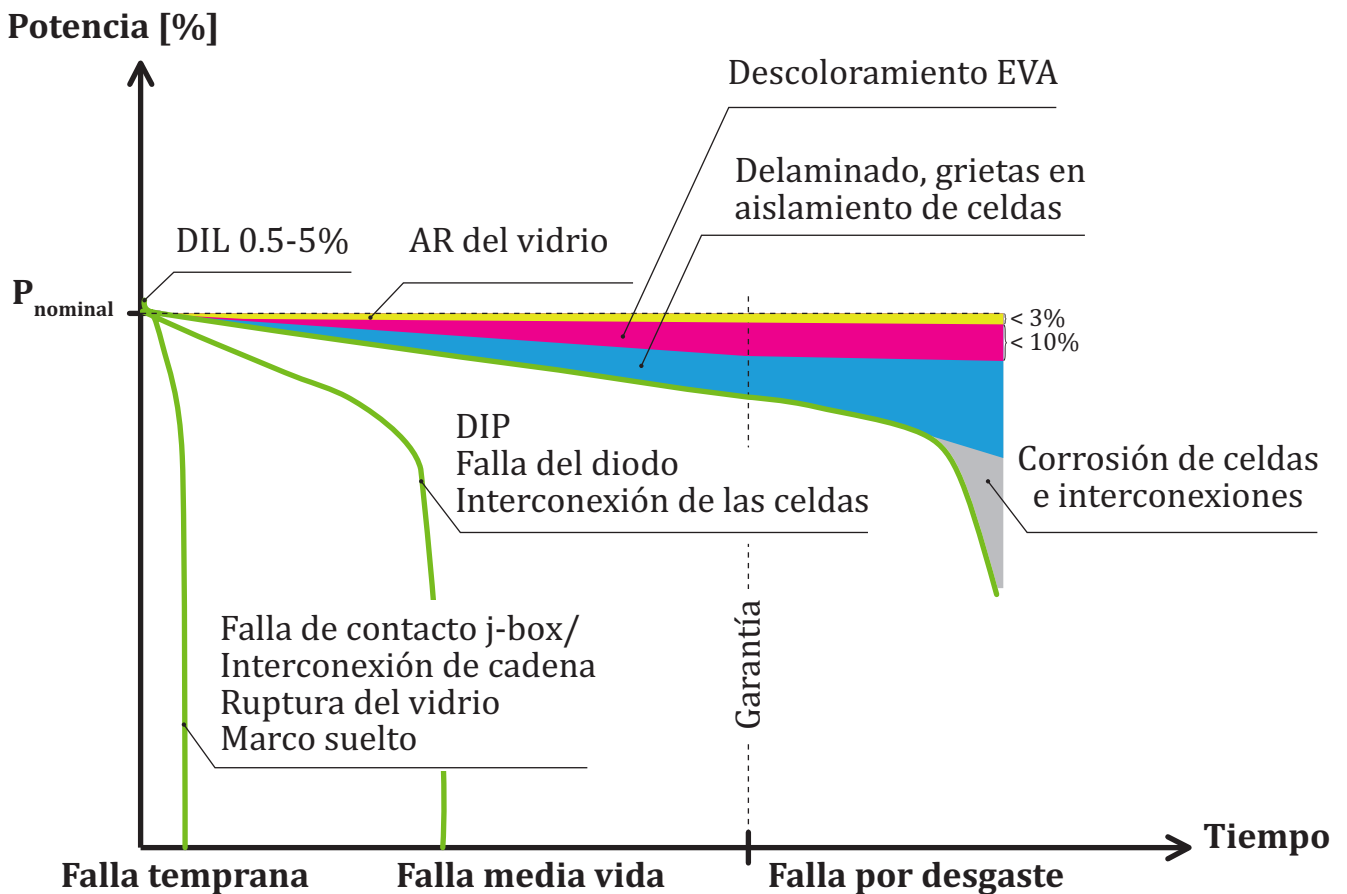


Fuente: Adaptado de Vázquez y Rey-Stolle, 2008.

A pesar de la alta confiabilidad, existen fallas que afectan a los paneles FV en un corto y mediano plazo. Un estudio basado en Alemania encontró que los paneles FV defectuosos y las conexiones defectuosas suelen fallar con rapidez, dentro de los primeros 2 años de operación. Las fallas tempranas más comunes se deben a “la pérdida de potencia, problemas en la caja de conexiones y cableado, ruptura de vidrio y la interconexión de las celdas” (Köntges et al., 2014, p. 4). Posteriormente,

acumulando las posibles fallas a mediano plazo, “se predice que el 2% de los paneles FV no cumplirán la garantía del fabricante después de 11-12 años de operación” (Köntges et al., 2014, p. 5), la mayoría por problemas relacionados con fallas en la interconexión de los módulos y ruptura del vidrio. Köntges y colegas (2014) reportan las fallas más comunes, identificadas por su etapa de aparición y su impacto en la generación del panel FV en la Figura 2.

Figura 2. Tres escenarios de fallas típicas de módulos fotovoltaicos con obleas cristalinas



Acrónimos: DIL - Degradación inducida por la luz, DIP - Degradación inducida potencial, j-box - Caja de juntas.

Fuente: Adaptado de Köntges et al., 2014.

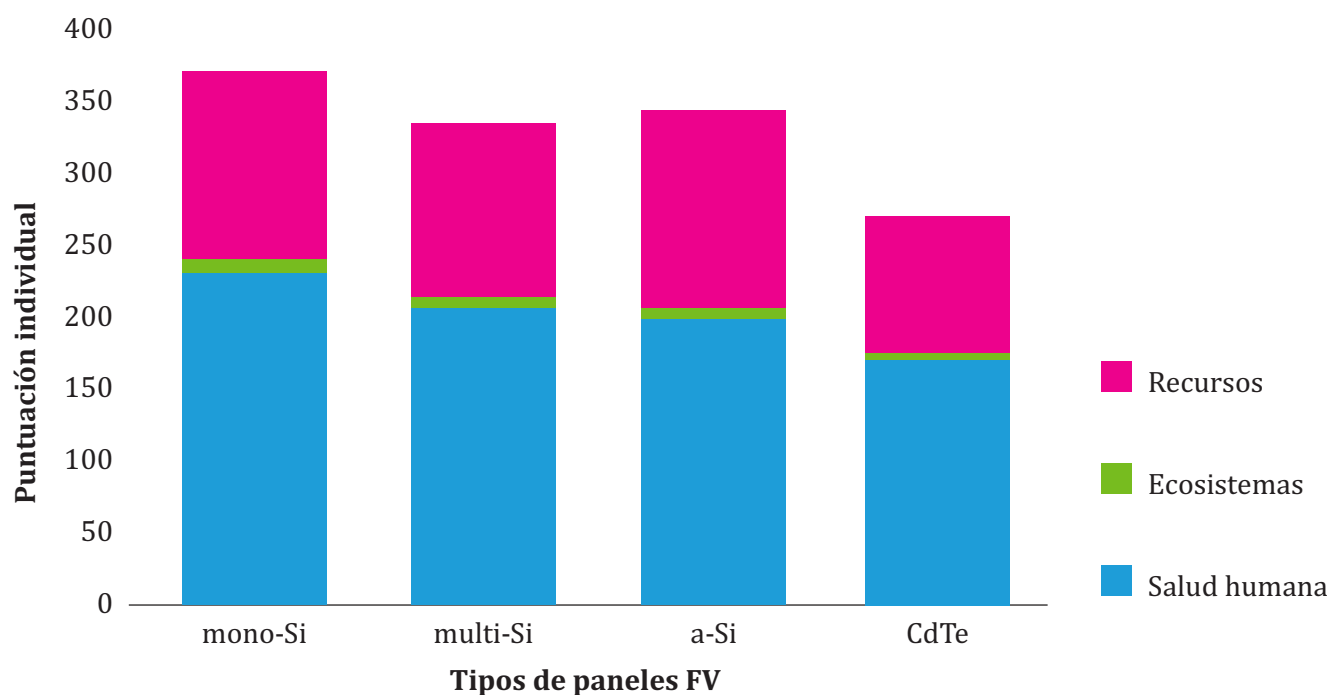
Adicional a las fallas, es probable que un porcentaje de los paneles FV no lleguen al periodo garantizado de desempeño por degradación debido a que las necesidades del usuario lo lleven a repotenciar el sistema. Particularmente en proyectos centralizados, de gran escala o a nivel suministrador existe la posibilidad de repotenciar la planta antes del fin de vida de los paneles FV, lo cual podría agravar el impacto socio-ambiental de esos proyectos al desperdiciar el potencial de generación remanente en los paneles FV.

Con el rápido avance de la tecnología fotovoltaica, la mayoría de los ACV, incluso algunos realizados apenas hace algunos años, utilizan paneles FV cuya eficiencia es notablemente menor a la disponible en la actualidad comercialmente, lo cual podría estar sobrevalorando su impacto ambiental. Lunardi et al., por ejemplo, identificaron que los paneles con tecnología PERC (*Passivated Emitter and Rear Cell*) tienen mejores prestaciones ambientales (2018). Gazbour et al. igualmente encontraron un menor impacto ambiental conforme mayor es la eficiencia de los paneles fotovoltaicos (2018).

La mayor densidad energética, al requerir menos área de generación y por ende cambio de uso de suelo, es un beneficio ambiental que no se ve reflejado en implementaciones en azoteas donde no existe cambio de uso de suelo. Muteri et al. estiman que el impacto ambiental de las nuevas generaciones FV es considerablemente menor al impacto de los módulos de silicio (2020) que conforman el 90% de los paneles FV en el mercado actualmente (Lunardi et al., 2018).

Dentro de las tecnologías FV más disponibles en el mercado en la actualidad, Rashedi y Khanam (2020) presentan en la Figura 3 el impacto socio-ambiental de la cuna a la tumba, utilizando una escala en la que cada punto representa el impacto anual de un ciudadano promedio. Los paneles monocristalinos (mono-Si) tienen una huella 11% mayor que los paneles policristalinos y 38% mayor que los de Telurio de Cadmio (CdTe), aunque el contenido de cadmio de estos últimos puede dificultar su reciclaje o disposición final adecuado excepto en plantas especializadas.

Figura 3. ACV de diferentes tecnologías FV.

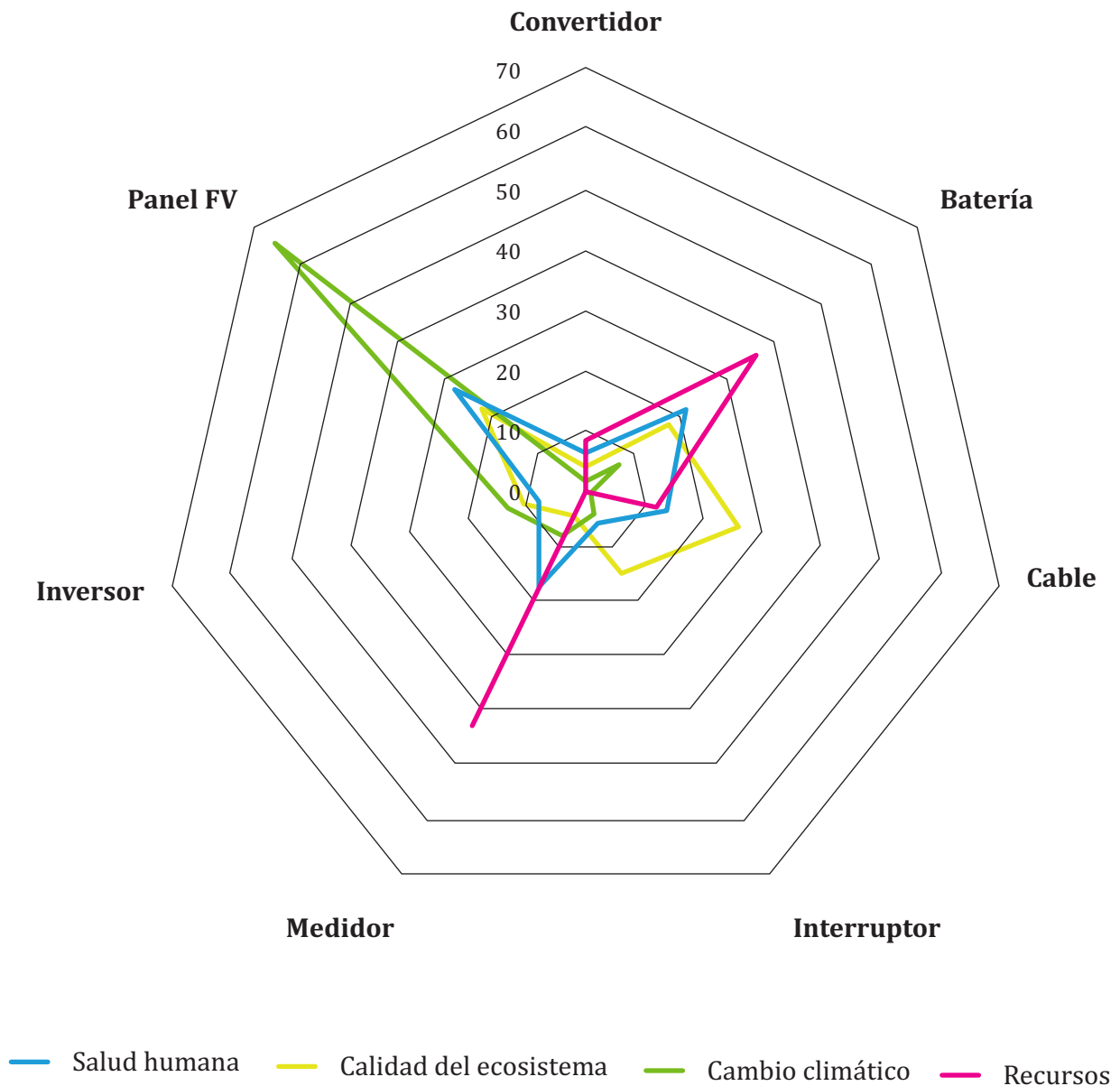


Fuente: Adaptado de Rashedi y Khanam, 2020.

Si bien el panel FV es el responsable de la mayor cantidad del impacto (Rashedi & Khanam, 2020), los SFVI requieren adicionalmente de un inversor, una instalación eléctrica, un montaje y baterías para sistemas con almacenamiento de energía. Mahmud et al. presentan en la Figura 4 que un SFVI que no requiere batería, evita los mayores impactos de un SFVI en recursos

y salud humana. De igual forma, un SFVI que disminuye el cableado en corriente directa (que requiere un mayor calibre), con el uso de microinversores o micro-SFVI que aprovechen la red eléctrica del inmueble, evita el mayor impacto en recursos y calidad del ecosistema. Lo mismo ocurre al utilizar un solo medidor bidireccional (Mahmud et al., 2018).

Figura 4. Categorías de impacto de los componentes de un SFVI.



Fuente: Adaptado de Mahmud et al., 2018.

Para instalaciones a gran escala montadas sobre el piso, como es el caso de plantas de generación central, donde la estructura de montaje suele ser más voluminosa, Beylot et al. reportan que “el uso de aluminio reciclado para la estructura de montaje reduce significativamente los impactos en un 42% para cambio climático, 39% para salud humana y 25% en recursos” (2014). Esto apunta a que el perfil socio-ambiental de un SFVI también pudiera beneficiarse al utilizar estructuras de montaje de aluminio reciclado.

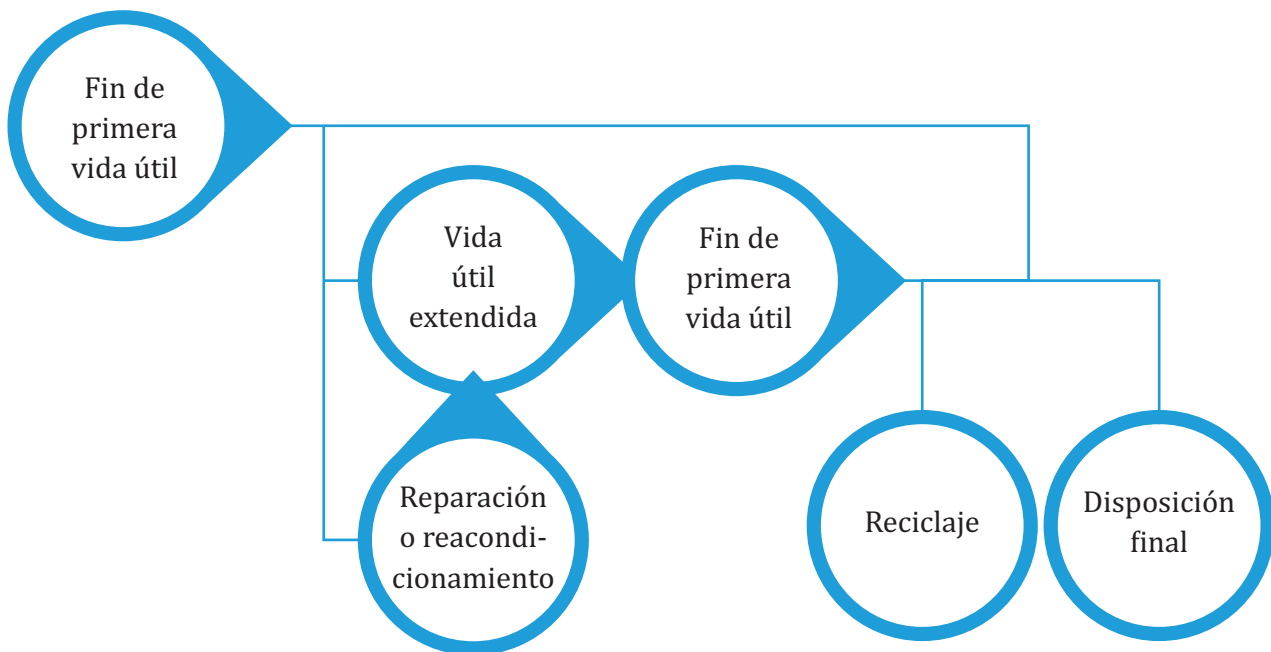
A partir de esta información es posible concluir que las diferentes tecnologías y componentes que conforman un SFVI inciden significativamente en su impacto socio-ambiental. Los paneles FV son el componente que mayor impacto genera, y existen diferencias considerables entre las dife-

rentes tecnologías, siendo la monocristalina la de mayor impacto y las nuevas tecnologías PERC y CdTe las de menor impacto. Por último, evitar o reducir el uso de cableado, batería y medidores adicionales puede tener una reducción significativa en el impacto socio-ambiental de los SFVI.

Fin de la vida útil

Al término de la vida útil de un panel FV existen varias alternativas. Como se muestra en la Figura 5, al fin de su vida útil, el panel FV podría ser reciclado o puesto en disposición final. Alternativamente, podría tener una vida útil extendida en el mercado secundario, pudiendo requerir reparación o remanufactura, antes del fin de su vida útil extendida.

Figura 5. Flujo de fin de vida útil FV.



Fuente: Elaboración propia.

La ruta que menor impacto socio-ambiental presenta, pues maximiza la utilización de los recursos ya invertidos en la fabricación del panel FV, es aquella que extiende su vida útil.

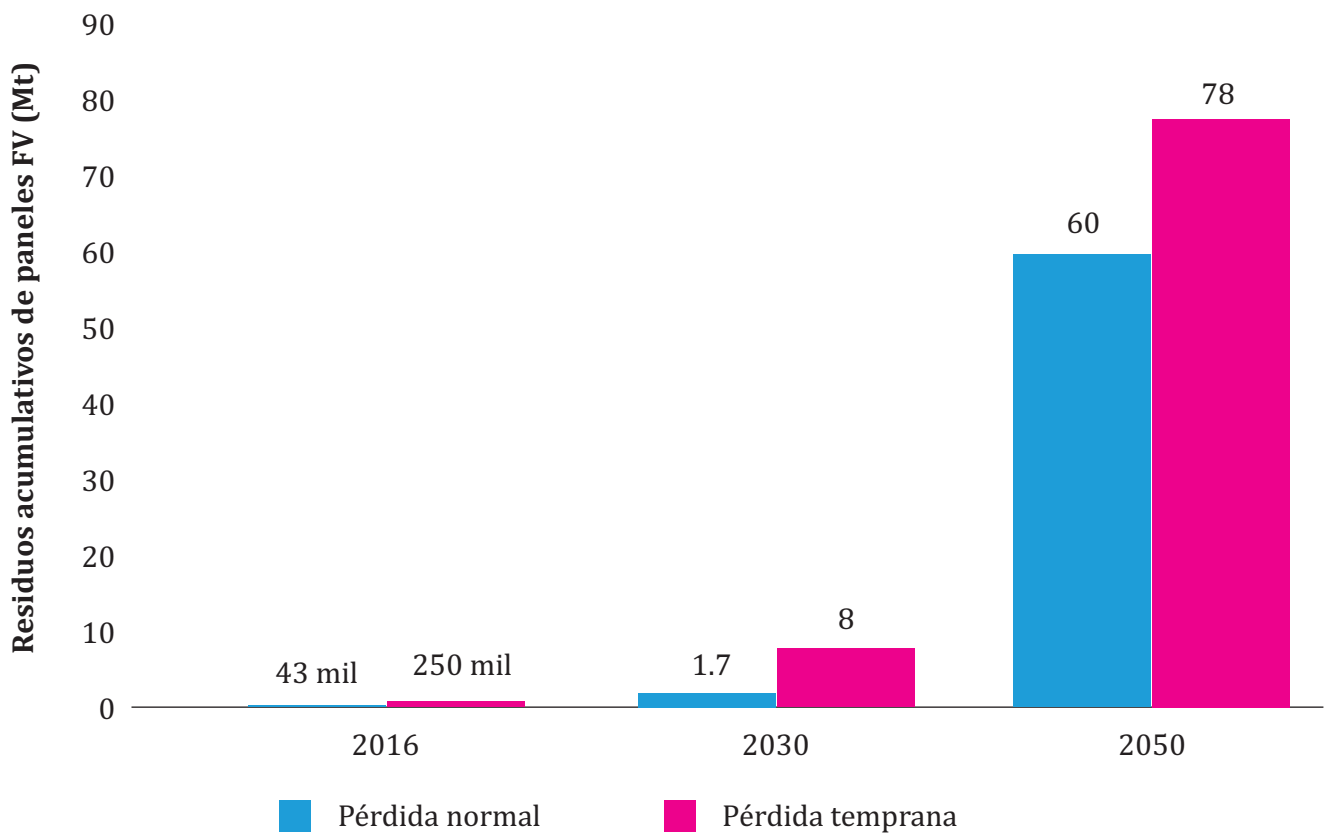
En mercados desarrollados, existe una naciente industria para la reparación, remanufactura y colocación en el mercado secundario de los paneles FV usados, lo cual podría extender la

vida del pequeño porcentaje de paneles que tiene fallas prematuras o de los paneles FV que son reemplazados al repotenciar una planta. Algunas de estas empresas, ofrecen el servicio de reciclaje si la reparación no es viable, como es el caso de Rinovasol en Alemania y RecyclePV en Estados Unidos. Por otro lado, Secondsol en Alemania y EnergyBin en Estados Unidos, han creado adicionalmente un mercado de segunda mano para componentes de SFVI, en donde se pueden adquirir componentes usados o remanufacturados. Ya que el costo de reparación puede ser elevado, ésta se privilegia cuando no quiere modificarse las prestaciones de un arreglo solar existente. Así como con el reciclaje, el costo de reparación o remanufactura podrían verse mejorados con la escala y con diseños que de origen contem-

plen estas posibilidades de la cuna a la cuna (Contreras-Lisperguer et al., 2017).

El reciclaje de los paneles FV es un tema ampliamente estudiado, pues su disposición final puede generar lixiviados tóxicos y los paneles FV contienen materiales de gran valor que pueden ser recuperados. “Los residuos de módulos solares FV ofrecen una rica fuente de energía y materiales que se pueden reutilizar y convertir en nuevos paneles FV, dispositivos electrónicos y otros productos” (Contreras-Lisperguer et al., 2017), existiendo paralelos con el reciclaje de semiconductores. Sin embargo, su reciclaje es aún limitado debido al modesto volumen de residuos disponibles como muestra IRENA en la Figura 6 y a la falta de regulación.

Figura 6. Proyección de desechos FV acumulados.



Fuente: Adaptado de Weckend et al., 2016.

Existen diversos estudios enfocados en proponer marcos regulatorios y procesos de reciclaje más efectivos, pues se requiere de una aproximación sistémica para hacer viable el reciclaje. Por ejemplo, un estudio de Curtis y colegas del NREL reporta que:

La recolección, transporte y reciclaje de los módulos PV es actualmente prohibitivo y más caro que la disposición final. Evidencia anecdótica sugiere que el costo de reciclar un módulo en Estados Unidos va desde \$15-\$45 USD por módulo, mientras que un estudio del costo de disposición final en rellenos sanitarios no peligrosos puede costar menos de \$1 USD por módulo y menos de \$5 USD en un relleno sanitario para residuos peligrosos. En comparación, en Europa, donde los países cuentan con regulaciones que obligan al reciclaje de los módulos PV, el costo de reciclaje es tan bajo como \$0.70 USD por módulo y las tasas de reciclaje alcanzan el 95% (2021).

Además de reutilizar el silicio grado solar, “las aplicaciones del reciclaje de los materiales recuperados de los paneles FV al fin de su vida útil, tienen una alta demanda en otras industrias, por ejemplo, para la producción de baterías de Li-Ion, geopolímeros, cemento, ladrillo y cerámica, cosméticos y la manufactura de pinturas” (Mahmoudi et al., 2019). Por ello, un estudio estimó que el valor de los materiales recuperados para Estados Unidos representa un potencial de \$60 millones USD para el 2030 y \$2 billones de USD para el 2050 (Weckend et al 2016, EPA 2019a, citados en Curtis et al., 2021). Sin embargo, con los procesos y volúmenes actuales, Lunardi et al. concluyen que “actualmente el reciclaje de los módulos FV de silicio no es rentable aunque es probable que sea obligatorio en más jurisdicciones” y por ello estiman solo se recicla actualmente el 10% de todos los módulos FV a nivel global (Lunardi et al., 2018).

En los casos donde la regulación es laxa y la industria de reciclaje es incipiente, Curtis et

al. apuntan a la posibilidad de “compañías de reciclaje y otras partes interesadas (p.e. compañías de logística inversa) pueden expandir sus líneas de negocio y servicios para incluir el reciclaje de módulos FV y vender los materiales recuperados” (Curtis et al., 2021). Sin embargo, cuando el reciclaje no es adecuado, “la mayoría solo recupera el vidrio, el marco de aluminio y cableado de cobre exterior y no tienen la capacidad de recuperar componentes de alto valor como la plata, el cobre y el silicio de grado solar” (Wambach et al. 2018, citado en Curtis et al., 2021).

A partir de esta información se identifica que la extensión de la vida-útil de los paneles FV en implementaciones donde aún son de utilidad, y en algunos casos, después de ser reparados o remanufacturados es una práctica que disminuye el impacto socio-ambiental. Al término de su vida útil, el impacto socio-ambiental disminuye con el reciclaje o con el aprovechamiento parcial de los residuos. Estos procesos seguirán mejorando a partir del desarrollo de diseños cuna a cuna, mejoras regulatorias y tecnologías de reciclaje.

CONCLUSIONES

A partir de la revisión de literatura realizada, es posible concluir que las diferentes tecnologías y componentes que conforman un SFVI inciden significativamente en su impacto socio-ambiental. Los paneles FV son el componente que mayor impacto genera, y existen diferencias considerables entre las diferentes tecnologías, siendo la monocristalina la de mayor impacto y las nuevas tecnologías PERC y CdTe las de menor impacto. El origen de los módulos FV, particularmente la mezcla de combustibles que se utiliza en su fabricación y el uso de silicio reciclado, incide significativamente en el impacto ambiental. Con respecto al impacto social, es preferible favorecer el suministro desde regiones con un récord transparente en sus prácticas laborales. Por último, evitar o reducir

el uso de cableado, batería y medidores adicionales puede tener una reducción significativa en el impacto socio-ambiental de los SFVI.

La extensión de la vida-útil de los paneles FV en implementaciones donde aún son de utilidad, y en algunos casos, después de ser reparados o remanufacturados es una práctica que disminuye su impacto socio-ambiental. Posteriormente, al término de su vida útil, el impacto socio-ambiental es disminuido con su reciclaje o con su aprovechamiento parcial en lo que los diseños cuna a cuna, la regulación y las tecnologías de reciclaje optimizan el proceso y la captura del valor residual, así como la protección ambiental de cualquier remanente tóxico. ■

REFERENCIAS

- Beylot, A., Payet, J., Puech, C., Adra, N., Jacquin, P., Blanc, I., & Beloin-Saint-Pierre, D. (2014). Environmental impacts of large-scale grid-connected ground-mounted PV installations. *Renewable Energy*, 61, 2–6. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.04.051>
- Brakels, R. (2019, enero 21). *Do Solar Panels Degrade Over Time? Yes, But Not By Much*. Solar Quotes Blog. <https://www.solarquotes.com.au/blog/solar-panel-degradation/>
- Braw, E. (2021, abril 12). When Clean Energy Is Powered by Dirty Labor. *Foreign Policy*. <https://foreignpolicy.com/2021/04/12/clean-energy-china-xinjiang-uyghur-labor/>
- Contreras-Lisperguer, R., Muñoz-Cerón, E., Aguilera, J., & Casa, J. de la. (2017). Cradle-to-cradle approach in the life cycle of silicon solar photovoltaic panels. *Journal of Cleaner Production*, 168, 51–59. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.206>
- Create New Revenue Streams*. (s/f). Recycle PV Solar. Recuperado el 5 de mayo de 2021, de <https://recyclepv.solar/create-new-revenue-streams/>
- Curtis, T., Buchanan, H., Heath, G., Smith, L., & Shaw, S. (2021). *Solar Photovoltaic Module Recycling: A Survey of U.S. Policies and Initiatives* (NREL/TP-6A20-74124, 1774839, MainId:6273; p. NREL/TP-6A20-74124, 1774839, MainId:6273). <https://doi.org/10.2172/1774839>
- Gazbour, N., Razongles, G., Monnier, E., Joanny, M., Charbuillet, C., Burgun, F., & Schaeffer, C. (2018). A path to reduce variability of the environmental footprint results of photovoltaic systems. *Journal of Cleaner Production*, 197, 1607–1618. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.276>
- Hernández-Morales, A., Mathiesen, K., Lau, S., & Leali, G. (2021, febrero 10). *Fears over China's Muslim forced labor loom over EU solar power*. POLITICO. <https://www.politico.eu/article/xinjiang-china-polysilicon-solar-energy-europe/>
- Klugmann-Radziemska, E., & Kuczyńska-Łażewska, A. (2020). The use of recycled semiconductor material in crystalline silicon photovoltaic modules production—A life cycle assessment of environmental impacts. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 205, 110259. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.110259>
- Köntges, M., Kurtz, S., Packard, C., Jahn, U., Berger, K. A., & Kato, K. (2014). *Performance and reliability of photovoltaic systems: Subtask 3.2: Review of failures of photovoltaic modules: IEA PVPS task 13: external final report IEA-PVPS*. International Energy Agency, Photovoltaic Power Systems Programme.
- Liu, F., & van den Bergh, J. C. J. M. (2020). Differences in CO₂ emissions of solar PV production among technologies and regions: Application to China, EU and USA. *Energy Policy*, 138, 111234. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111234>
- Lunardi, M. M., Alvarez-Gaitan, J. P., & Corkish, J. I. B. and R. (2018). A Review of Recycling Processes for Photovoltaic Modules. En *Solar Panels and Photovoltaic Materials*. Intech Open. <https://doi.org/10.5772/intechopen.74390>
- M. Lunardi, M., Alvarez-Gaitan, J. P., Chang, N. L., & Corkish, R. (2018). Life cycle assessment on PERC solar modules. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 187, 154–159. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.08.004>

- Mahmoudi, S., Huda, N., Alavi, Z., Islam, M. T., & Behnia, M. (2019). End-of-life photovoltaic modules: A systematic quantitative literature review. *Resources, Conservation and Recycling*, 146, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.03.018>
- Mahmud, M., Huda, N., Farjana, S., & Lang, C. (2018). Environmental Impacts of Solar-Photovoltaic and Solar-Thermal Systems with Life-Cycle Assessment. *Energies*, 11(9), 2346. <https://doi.org/10.3390/en11092346>
- Murphy, L., & Elima, N. (2021). *In broad daylight: Uyghur forced labour and global solar supply chains*. Sheffield Hallam University Helena Kennedy Centre for International Justice.
- Muteri, V., Cellura, Curto, D., Franzitta, Longo, S., Mistretta, & Parisi, M. L. (2020). Review on Life Cycle Assessment of Solar Photovoltaic Panels. *Energies*, 13, 252. <https://doi.org/10.3390/en13010252>
- National Renewable Energy Laboratory (NREL). (2021). *Life Cycle Greenhouse Gas Emissions from Electricity Generation: Update* (NREL/FS-6A50-80580). <https://www.osti.gov/biblio/1820320>
- Nugent, D., & Sovacool, B. K. (2014). Assessing the lifecycle greenhouse gas emissions from solar PV and wind energy: A critical meta-survey. *Energy Policy*, 65, 229–244. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.10.048>
- Olowu, T. O., Sundararajan, A., Moghaddami, M., & Sarwat, A. I. (2018). Future challenges and mitigation methods for high photovoltaic penetration: A survey. *Energies*, 11(7), 1782.
- Overton, T. (2016, enero 1). The Energy Industry in Xinjiang, China: Potential, Problems, and Solutions. *POWER Magazine*. <https://www.powermag.com/energy-industry-xinjiang-china-potential-problems-solutions-web/>
- Rabaia, M. K. H., Abdelkareem, M. A., Sayed, E. T., Elsaid, K., Chae, K.-J., Wilberforce, T., & Olabi, A. G. (2021). Environmental impacts of solar energy systems: A review. *Science of The Total Environment*, 754, 141989. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141989>
- Rashedi, A., & Khanam, T. (2020). Life cycle assessment of most widely adopted solar photovoltaic energy technologies by mid-point and end-point indicators of ReCiPe method. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(23), 29075–29090. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09194-1>
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., Biggs, R., Carpenter, S. R., Vries, W. de, Wit, C. A. de, Folke, C., Gerten, D., Heinke, J., Mace, G. M., Persson, L. M., Ramanathan, V., Reyers, B., & Sörlin, S. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223). <https://doi.org/10.1126/science.1259855>
- Weckend, S., Wade, A., & Heath, G. A. (2016). *End of life management: Solar photovoltaic panels*. IRENA & IEA-PVPS. <https://www.osti.gov/biblio/1561525>