FUNCIONES, RIESGOS EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

1. Introducción

Los sistemas fotovoltaicos constituyen una tecnología estratégica en el marco de la transición energética, al permitir la generación de energía eléctrica a partir de la radiación solar mediante la conversión directa en corriente continua. Estos sistemas están conformados por un conjunto de subsistemas interrelacionados —generación, conversión, almacenamiento, conducción y protección, estructura y balance del sistema (BOS)— que integran múltiples componentes fabricados con materiales semiconductores, metálicos, poliméricos y electroquímicos.

Si bien su operación contribuye a la reducción de emisiones, su ciclo de vida implica la generación de residuos eléctricos y electrónicos, así como riesgos asociados a su manipulación, transporte y disposición final. A nivel internacional, organismos como International Renewable Energy Agency y IEA Photovoltaic Power Systems Programme han señalado la necesidad de abordar estos sistemas bajo un enfoque de gestión integral de riesgos y ciclo de vida.

En Colombia, este enfoque se encuentra respaldado por la Ley 1672 de 2013, el Decreto 284 de 2018 y el Decreto 4741 de 2005, los cuales establecen obligaciones específicas para la gestión de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) y residuos peligrosos.

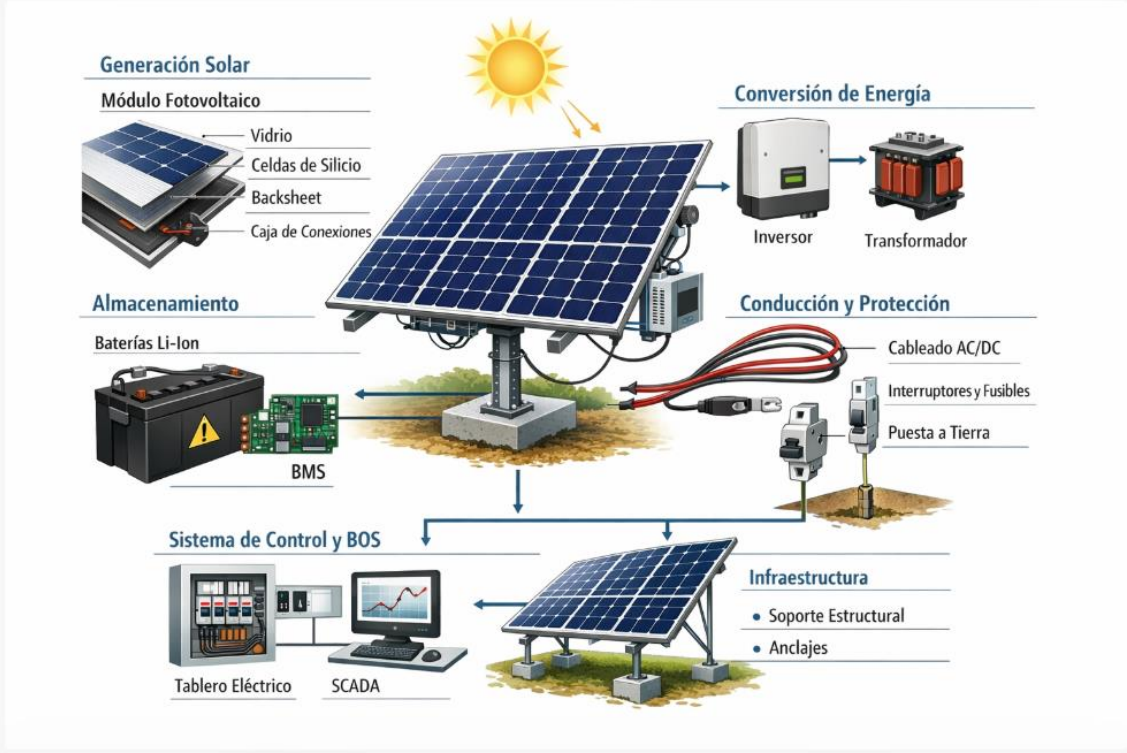


Imagen 1. Componentes de los sistemas fotovoltaicos

2. Subsistema de generación: módulos fotovoltaicos

El subsistema de generación tiene como función captar la radiación solar y transformarla en energía eléctrica en corriente continua (DC). Está compuesto por las celdas fotovoltaicas, el vidrio templado, el encapsulante (EVA), el backsheet, el marco estructural, así como por elementos eléctricos como la caja de conexiones, los diodos y el cableado DC.

Las celdas fotovoltaicas, elaboradas principalmente con silicio cristalino y metales como plata y aluminio (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, 2023), constituyen el núcleo del sistema al realizar la conversión energética. En condiciones de fractura, pueden liberar metales pesados, generando riesgos de exposición para las personas y de contaminación para el ambiente (National Renewable Energy Laboratory, 2021). Por ello, deben manipularse evitando impactos y gestionarse como RAEE al final de su vida útil, conforme a la Ley 1672 de 2013.

El vidrio templado cumple una función de protección mecánica y transmisión de radiación solar, aunque su ruptura puede generar riesgos de cortes. El encapsulante (EVA) y el backsheet tienen funciones de sellado, aislamiento y protección frente a agentes ambientales, pero presentan desafíos de reciclabilidad y pueden generar emisiones tóxicas en caso de combustión (European Commission Joint Research Centre, 2019).

El marco de aluminio proporciona rigidez estructural y facilita la instalación, con bajo impacto ambiental debido a su alta reciclabilidad. Por su parte, la caja de conexiones, los diodos y el cableado DC permiten la interconexión eléctrica y la protección del módulo, pero implican riesgos eléctricos, térmicos y de incendio, especialmente en caso de fallas de aislamiento (IEEE, 2018).

3. Subsistema de conversión eléctrica

El subsistema de conversión tiene como función transformar la energía generada en condiciones utilizables para consumo o conexión a la red eléctrica. Está compuesto por el inversor, los transformadores y los reguladores de carga.

El inversor convierte la corriente continua en corriente alterna (AC), siendo un elemento crítico para el funcionamiento del sistema. Debido a su operación a altos voltajes, presenta riesgos de electrocución y generación de calor, lo que puede derivar en incendios si no se cuenta con ventilación adecuada (IEEE, 2018). Al final de su vida útil, se clasifica como RAEE y debe gestionarse conforme al Decreto 284 de 2018.

Los transformadores cumplen la función de adaptar los niveles de voltaje, especialmente en sistemas de mayor escala. Cuando contienen aceites dieléctricos, pueden generar contaminación ambiental en caso de fugas, lo que los vincula con el régimen de residuos peligrosos establecido en el Decreto 4741 de 2005.

El regulador de carga, presente en sistemas con almacenamiento, controla el flujo de energía hacia las baterías, evitando sobrecargas y prolongando su vida útil, aunque también implica riesgos eléctricos si no se manipula adecuadamente.

4. Subsistema de almacenamiento

El subsistema de almacenamiento tiene como función almacenar la energía generada para su uso posterior. Está compuesto por las baterías, el sistema de gestión de baterías (BMS) y las carcasas de protección.

Las baterías, especialmente las de ion-litio, contienen materiales reactivos y electrolitos inflamables, lo que implica riesgos de incendio, explosión y liberación de sustancias tóxicas (International Energy Agency, 2021). Estos riesgos pueden afectar gravemente a las personas y generar contaminación ambiental severa.

En Colombia, su manejo se encuentra regulado tanto por el régimen de RAEE como por el de residuos peligrosos, lo que exige su transporte, almacenamiento y disposición final mediante gestores autorizados, conforme al Decreto 4741 de 2005.

El sistema BMS cumple la función de monitorear y controlar parámetros críticos como temperatura, voltaje y carga, reduciendo los riesgos operativos. Las carcasas de las baterías proporcionan protección física, aunque pueden generar residuos sólidos si no se gestionan adecuadamente.

5. Subsistema de conducción y protección

Este subsistema tiene como función transportar la energía eléctrica y proteger el sistema frente a fallas. Está compuesto por el cableado AC/DC, interruptores, fusibles, dispositivos de protección contra sobretensiones (SPD) y sistemas de puesta a tierra.

Estos componentes presentan riesgos eléctricos significativos, incluyendo electrocución e incendios en caso de fallas de aislamiento o sobrecargas (IEEE, 2021). La normativa colombiana establece que, al finalizar su vida útil, deben ser gestionados como RAEE y no pueden ser dispuestos junto con residuos ordinarios, en cumplimiento de la Ley 1672 de 2013 y la Resolución 851 de 2022.

6. Subsistema estructural y balance del sistema (BOS)

El subsistema estructural y BOS tiene como función garantizar la estabilidad física, la integración de los componentes y el monitoreo del sistema. Incluye estructuras de soporte, anclajes, sistemas de seguimiento solar (trackers), tableros eléctricos, sistemas SCADA e infraestructura civil.

Las estructuras de soporte, generalmente fabricadas en acero o aluminio, permiten la instalación de los módulos en condiciones óptimas. Los anclajes aseguran su fijación al terreno, mientras que los trackers optimizan la captación solar mediante el seguimiento del sol. Estos elementos presentan riesgos mecánicos durante su instalación, así como posibles alteraciones del suelo.

Los tableros eléctricos y sistemas SCADA permiten la distribución y monitoreo del sistema, respectivamente, y se clasifican como RAEE al final de su vida útil. La infraestructura civil, aunque no se considera RAEE, puede generar impactos sobre el suelo que deben ser gestionados mediante buenas prácticas constructivas.

El análisis de los componentes evidencia que los sistemas fotovoltaicos requieren una gestión integral que articule la seguridad industrial, la gestión ambiental y el cumplimiento normativo.

El marco colombiano establece obligaciones claras, entre ellas:

- La implementación de sistemas de recolección y gestión de RAEE (Ley 1672 de 2013)
- La aplicación del principio de Responsabilidad Extendida del Productor
- La gestión diferenciada de residuos eléctricos y electrónicos
- El manejo especializado de residuos peligrosos (Decreto 4741 de 2005)

Este enfoque es consistente con las recomendaciones internacionales de organismos como International Renewable Energy Agency, IEA Photovoltaic Power Systems Programme y National Renewable Energy Laboratory, que promueven la adopción de esquemas de economía circular y gestión del ciclo de vida.

La adecuada gestión de estos componentes, articulando estándares internacionales con el marco normativo colombiano, permite garantizar la seguridad de las personas, prevenir impactos ambientales y fortalecer la sostenibilidad de los proyectos fotovoltaicos en el país.

Referencias bibliográficas

Internacionales

- International Renewable Energy Agency (2016). *End-of-life management: Solar photovoltaic panels*.
- IEA Photovoltaic Power Systems Programme (2020). *Safety and environmental aspects of PV systems*.
- Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (2023). *Photovoltaics Report*.
- National Renewable Energy Laboratory (2021). *Life Cycle Assessment of Photovoltaic Systems*.
- European Commission Joint Research Centre (2019). *End-of-life management of solar panels*.
- IEEE (2018). *Standards for photovoltaic systems*.

- International Energy Agency (2021). *Energy Storage and Battery Safety*.

Nacionales (Colombia)

- Ley 1672 de 2013 – Política pública de RAEE
- Decreto 284 de 2018 – Reglamentación RAEE
- Decreto 4741 de 2005 – Residuos peligrosos
- Resolución 851 de 2022 – Lineamientos RAEE