



Ensayo científico

## Disposición final e impacto ambiental de las celdas fotovoltaicas

Final disposal and environmental impact of photovoltaic cells

María Mónica Sierra Céspedes<sup>a</sup>, Carmen Luisa Vásquez Stanescu<sup>b</sup>, Rodrigo Ramírez-Pisco<sup>c</sup>

<sup>a,c</sup>Universidad de Barcelona, España.

<sup>b</sup>Universidad Nacional Experimental Politécnica Antonio José de Sucre, Venezuela.

<sup>c</sup>Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.

DOI: <http://doi.org/10.13140/RG.2.2.36089.60004/1>

Recibido: 05-11-2020

Aceptado: 12-05-2021

### Resumen

El presente trabajo tiene como propósito describir el proceso de disposición final las celdas fotovoltaicas. En el mismo se muestra un panorama general de las celdas, su industria y tipos. Adicionalmente, se describen los materiales de fabricación y el proceso de disposición final, describiendo sus ventajas y desventajas. Este proceso se clasifica según la separación de materiales, el tipo de celdas, y su impacto al ambiente.

**Palabras clave:** paneles fotovoltaicos, disposición final, celdas fotovoltaicas, impacto al medio ambiente.

*Código UNESCO: 3308.07 - Eliminación de residuos.*

### Abstract

The purpose of this work is to describe the process of final disposal of photovoltaic cells. It shows an overview of the cells, their industry and types. Additionally, the manufacturing materials and the final disposal process are described, describing their advantages and disadvantages. This process is classified according to the separation of materials, the type of cells, and their impact on the environment.

**Keywords:** photovoltaic panels, final disposal, photovoltaic cells, impact on the environment.

*UNESCO Code: 3308.07- Waste disposal.*

## 1. Introducción

El consumo energético es un factor importante para el desarrollo y crecimiento de las sociedades; sin embargo, los impactos al medio ambiente y a la salud de las personas, generados por el uso y consumo de los combustibles fósiles, han promovido políticas e incentivos para la implantación de fuentes de generación de energías limpias, fiables y, sobre todo, sostenibles [1][2][3][4], con base a fuentes renovables, entre ellas la solar. La sostenibilidad debe ser vista desde las etapas dedicadas a su fabricación, instalación, operación, mantenimiento y disposición final [5]. Al fin de su vida última es importante reutilizar o reciclar las partes o materiales componentes con los cuales están contruidos los equipos de estas fuentes de generación [6].

ISSN 1856-8890 EISSN 2477-9660. Dep. Legal pp200702LA2730, ppi201402LA4590. Licencia CC BY-NC-SA  
Email addresses: mariamonicasc@hotmail.com (María Sierra Céspedes), cvasquez@unexpo.edu.ve (Carmen Vásquez Stanescu), rramirez@unibarcelona.com (Rodrigo Ramírez-Pisco)

En la última década, la caída en los precios de los paneles fotovoltaicos ha dado la oportunidad de incrementar la inversión en la producción de energía pasando de 39.603 MW a 480.357 MW en los años 2010 a 2018, respectivamente, según la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA) [7]. Actualmente, existe un acelerado impulso para la generación de energía eléctrica en base a fuentes renovables, entre éstas la solar fotovoltaica. La fuente solar fotovoltaica utiliza celdas que utilizan la radiación solar para la transformación de la energía solar en eléctrica, entre otros dispositivos. Fue en 1854, cuando se desarrolla por primera vez esta celda de manera comercial [8]. Sin embargo, a partir del año 2008, hubo una explosión significativa en el uso de estas fuentes [9]. Han pasado más de 20 años de esta explosión y aún existe un debate sobre el reciclaje de las partes de los sistemas fotovoltaicos, entre esos las celdas. En este sentido, se presenta un trabajo que tiene como propósito mostrar las alternativas que se desarrollan para lograr la adecuada disposición final de celdas fotovoltaicas.

El período de vida en operación, aproximadamente de 30 años (con potencia nominal del 70%) y de 25 (con una potencia nominal del 80%)[9][10], y bajo impacto ambiental, hace atractivo la implementación de grandes plantas solares para abastecimiento de energía en lugares remotos. Sin embargo, el tratamiento al final de la vida útil de las celdas y otros componentes hace necesario reevaluar su uso y posibles impactos.

El presente trabajo muestra las alternativas que se han implementado para realizar adecuadamente la disposición final e impacto ambiental de las celdas fotovoltaicas. La metodología seguida consiste en una investigación descriptiva, con diseño no experimental, que permite relacionar las características constructivas de las celdas fotovoltaicas, clasificadas en monocristalinas, policristalina y de película delgada con su disposición final, considerando los procesos de remoción y de recuperación.

Se dedican secciones relacionadas con las celdas fotovoltaicas (de silicio y película delgada), la industria solar y sus componentes, como preámbulo sobre su disposición final. Finalmente, de manera descriptiva, se incluye los procesos de separación de las partes, los posibles porcentajes de material reciclado y las normativas de tratamiento de materiales peligrosos, por el uso de metales tóxicos para la fabricación que compromete el proceso de disposición final.

## **2. Desarrollo**

### **2.1 Celdas fotovoltaicas**

Según IRENA [7], desde el año 2010 hasta el 2018 la capacidad instalada de paneles solares se ha incrementado un 91,62% y la producción de energía en base a esta fuente en un 92,4% entre 2010 y 2017, como se muestra en la Figura 1. El crecimiento de la industria fotovoltaica se ha acelerado durante la última década por la disminución en los costos de los paneles, favorecido por la innovación en los materiales de las celdas [7] y las políticas e incentivos para el uso de las fuentes de generación de energía eléctrica en base a las renovables que existen actualmente a nivel mundial. Esto ha favorecido el incremento de parques solares ubicados principalmente en China, India, México y Estados Unidos, como se muestra en el Cuadro 1, en este se observa que la mayor capacidad instalada de generación fotovoltaica se encuentra en China, país controversial por su matriz energética a base de carbón [11].

Sólo para el 2017, los países como Reino Unido, Alemania y España estiman un total de 1.026,48; 3.440.000 y 488.000 toneladas de paneles fotovoltaicos instalados en su territorio, respectivamente [12]. Sin embargo, no se cuenta con una estructura de tratamiento para los residuos que se generan pudiendo perder materia prima, oportunidades de negocio y de economía circular [13].

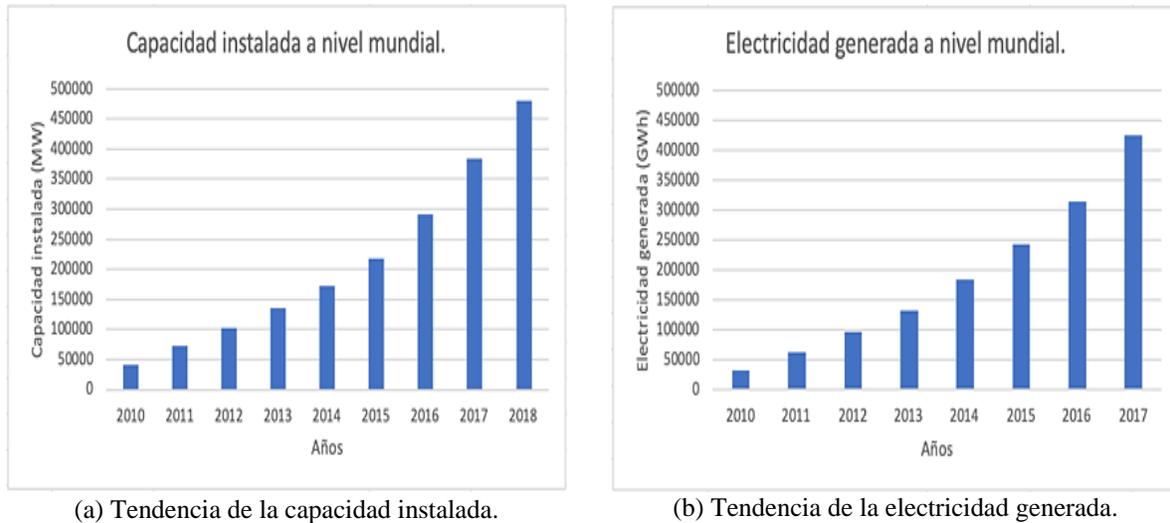


Fig 1. Tendencias a nivel mundial [14].

Cuadro 1. Principales parques solares en el mundo [15].

No.	Parque	Capacidad (MW)	País
1	Parque Solar del Desierto de Tengger	1.547	China
2	Kurnool Ultra Mega Solar Park	1.000	India
3	Parque Solar Datong	1.000	China
4	Longyangxia Hydro- Solar PV Station	850	China
5	Parque Solar PV Villanueva.	828	México
6	Rewa Ultra Mega Solar.	750	India
7.	Planta fotovoltaica de Kamuthi	620	India
8.	Parque solar Bhadla	620	India
9.	Parque Solar Pavagada	600	India
10.	Solar Star Solar Farm I y II	597	Estados Unidos

### a. Industria de las celdas fotovoltaicas

Así como los principales parques solares se encuentran en China, su fabricación también se realiza principalmente en este país, siendo líder en los años 2017 y 2018. Sin embargo, también existen empresas de Estados Unidos, Taiwán, Corea del Sur y Canadá que construyen y desarrollan esta tecnología y compiten dentro del mercado internacional con paneles solares de alta calidad (ver Cuadro 2). Éstas se encargan del desarrollo, diseño, fabricación, manufactura y venta de células y módulos solares de silicio cristalino. No todas estas empresas se encargan de la creación de las celdas fotovoltaica, algunos compran directamente las partes hechas y la ensamblan para, finalmente, vender y distribuir los paneles a los diferentes clientes. Países como Alemania han quedado fuera de competencia en el mercado por empresas chinas que basan su producción en economía a escala, generando una diferencia en el precio final [16].

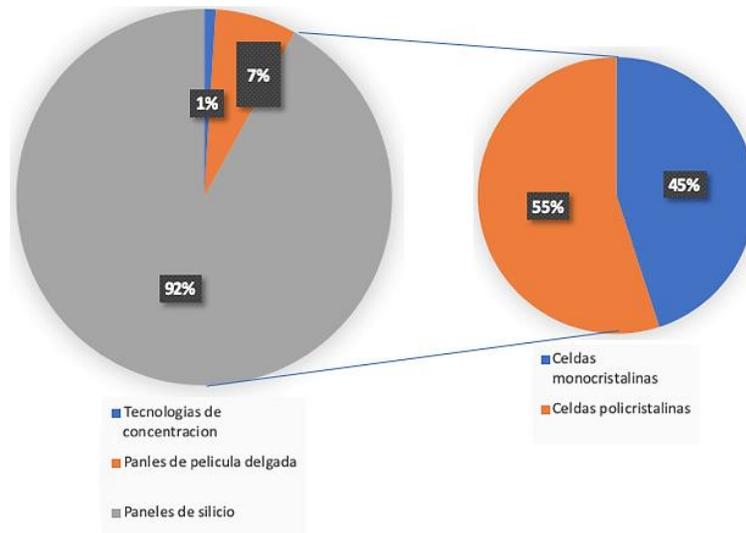
### b. Tipos de celdas

Obtener energía a partir de celdas solares ha sido un proceso donde se ha investigado, creado y desarrollado diferentes tecnologías de paneles que han mejorado su eficiencia cada vez más. Los paneles en la industria han sido principalmente de silicio, los cuales en el mercado global abarcan el

92%, de éstos el 55% corresponde a celdas policristalinas y el 45% a monocristalinas. En los años recientes, los paneles de película delgada han sido desarrollados como una opción más económica y viable a las cristalinas de silicio, representando el 7% y el 1% respectivamente. Estas pertenecen a tecnologías de fotovoltaica por concentración, representadas en la Figura 2.

**Cuadro 2.** Empresas productoras de paneles solares de alta calidad [17].

No.	Empresa	País
1	LG Energy	Corea del Sur
2	SunPower Corporation	Estados Unidos
3	Winaico	Taiwan
4	REC (Renewable Energy Corporation)	Noruega
5	Trina Solar	China
6	Hanwha Q-Cells	Corea del Sur
7.	Jinko Solar	China
8.	Canadian Solar	Canadá
9.	Seraphin	China
10.	JA Solar	China



**Fig 2.** Porcentajes de paneles en el mercado global [18].

### c. Paneles con tecnología de silicio

Estos paneles se presentan en dos (2) tipos, en primer lugar los paneles de celdas policristalinas, en estos, los procesos de filtrado para estas celdas son menores, por lo cual las impurezas no son eliminadas totalmente. El calentamiento y enfriado de manera artificial produce la creación de varios cristales en la célula. Su forma rectangular y coloración entre verde y azul son sus principales características, como se muestra en la Figura 3.a.

El segundo tipo de panel son las de celdas solares monocristalinas, las cuales están constituidas de un silicio de mayor pureza y calidad, lo que hace que el aprovechamiento de la energía sea mayor a la de las policristalinas y amorfas, dando un color uniforme negro o azul oscuro y mayor eficiencia a niveles bajos de luminosidad, como se muestra en la Figura 3.b. El cuadro 3 relaciona las comparaciones de los dos (2) tipos de celdas cristalinas de silicio.



**Fig 3.** Tipos de paneles con tecnología de silicio.

**Cuadro 3.** Comparativa de las características de las celdas solares cristalinas de silicio [23].

Característica	Policristalinas	Monocristalinas
Costo	De 5 a 7 por ciento más baratas que las monocristalinas	De 5 a 7 por ciento más caras que las policristalinas
Aprovechamiento de la energía	14 a un 16%	20 a 22%
Pureza del silicio	Con algunas impurezas	Sin impurezas
Usos	Sistemas fotovoltaicos	Sistemas fotovoltaicos

#### d. Paneles de película delgada

Los paneles de película delgada son el 7% del mercado global en la producción energética a partir de paneles solares. Estos paneles están compuestos por varias capas de materiales fotovoltaicos y su tamaño es menor que las tradicionales celdas de silicio, pudiendo ser 300 veces más pequeños [24]. Sus precios son más bajos que los paneles cristalinos, son flexibles y pueden adaptarse a diferentes espacios como se muestra en la Figura 4. Sin embargo, para alcanzar eficiencias altas es recomendable disponer de lugares amplios, pues por metro cuadrado un panel cristalino presenta mayor eficiencia que uno de película delgada y su degradación al igual, que su eficiencia por área, es menor [25]. Los sustratos implementados en este panel varían en las capas, al igual que su eficiencia, los cuatro (4) sustratos son [24]:

- Telurio de cadmio (*CdTe*): Es el más implementado en los paneles de película delgada. Su sustrato, el cadmio, es un elemento altamente tóxico, presentando eficiencias entre el 9-11%.
- Silicio amorfo (*a-Si*): Su fabricación ha sido en pequeña escala, con eficiencias bajas entre 6-8%. En comparación con los paneles *CdTe*, su toxicidad es menor y más duraderos que los *CdTe* y *CIGS*.
- Seleniuro de galio e indio galio (*CIGS*): En estos paneles la toxicidad es menor debido al bajo contenido de cadmio respecto a los *CdTe*, la eficiencia medida en laboratorio para espacios residenciales ha resultado ser entre 10-12%.
- Arseniuro de galio (*GaAs*): Paneles con mayor eficiencia, aproximadamente 28,8%. Por su alto costo se implementan en tecnología espacial.

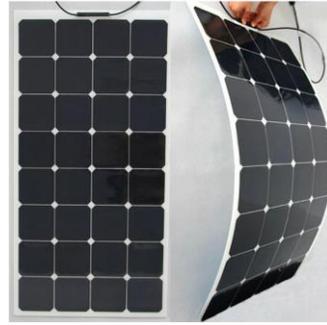


Fig 4. Panel de película delgada [24].

### e. Materiales utilizados en celdas fotovoltaicas

Los materiales comprendidos en los diferentes paneles pasan por un proceso de ensamble donde se encuentran materiales puros como el aluminio y aleaciones de los elementos como se describe a continuación [18]. En la Figura 5 se aprecian las partes que conforman un panel solar de silicio y de película delgada, respectivamente.

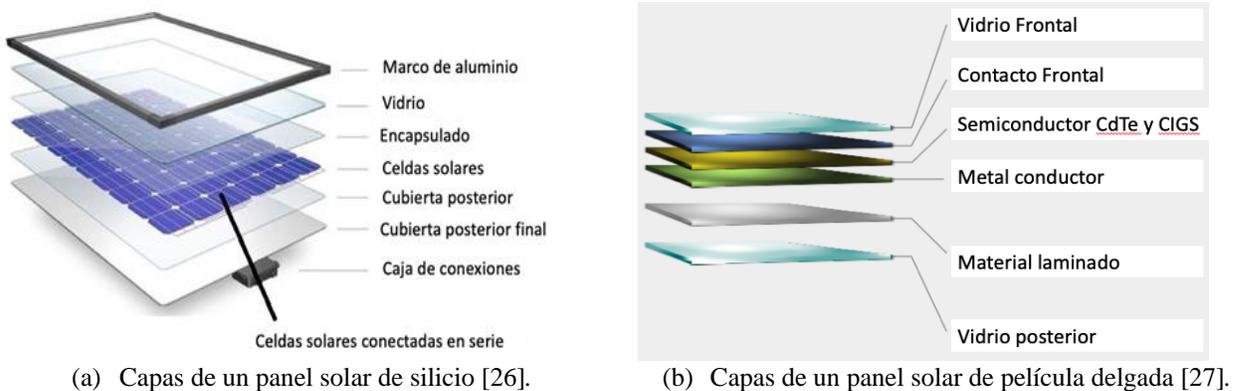


Fig 5. Partes que conforman un panel solar, según su tipo.

## 2.2 Materiales en los paneles de silicio

Por la unión interfacial límite entre materiales semiconductores (conocida como unión PN) presenta textura con forma piramidal para las monocristalinas y aleatorias para las policristalinas, cubiertas con una capa antireflectante para minimizar el reflejo de la luz. El frente y la parte posterior de la celda se contactan con pastas de aluminio y plata, encargadas de generar el campo eléctrico. Con la cocción, el aluminio es fundido en el silicio y forman el campo eléctrico de la superficie posterior, para optimizar los contactos de la celda se implementan el contacto con láser [18]. La tecnología de la celda de silicio policristalinas son las más usadas actualmente en el mercado global. Estas cuentan con seis (6) capas en las cuales cada una tiene una función y diferentes materiales en cada una, representes en el Cuadro 4. Siendo por lo general 76% de vidrio, 10% de polímero, 8% de aluminio, 5% de silicio, 1% de cobre, 1% de plata y materiales en menor participación como el plomo y estaño [27].

**Cuadro 4.** Materiales que componen cada una de las capas de las celdas policristalinas [28]

No. de capa	Nombre de la capa	Materiales de composición	Componentes químicos
1	Marco	Aluminio anodizado	Aluminio
2	Vidrio protector	Vidrio templado sosa	Sodio, Cal, Sílice
3	El encapsulante	Polímero de Etil-Vinil-Acetato (EVA)	Etileno Acetato de vinilo
4	Celdas solares e interconexiones metálicas	Cintas metálicas de silicio	Silicio, Plata, Aluminio, Plomo, Estaño
5	Cubierta posterior	Subcapa 1: polivinilo fluoruro (TEDLA) Subcapa 2: tereftalato de polietileno (Poliéster)	Polivinilo fluoruro Tereftalato de polietileno
6	Cubierta posterior final	Subcapa 3: polivinilo de fluoruro TEDLAR Polímero de Polifenilén éter	Polivinilo fluoruro Polifenilén éter

#### a. Materiales en los paneles de película delgada (Thin-film panels)

Son semiconductores recogidos en capas delgadas de metal, vidrio o polímeros y los dos (2) más implementados en la industria actualmente son: *CIGS* y *CdTe*. Los *GIGS* están conformados por semiconductores como seleniuro de galio y utilizan Cobre, Selenio, Indio, Galio y Zinc. Su composición es de 88% vidrio, 7% aluminio, 4% polímeros, 1% metal semiconductor distribuido en 10% cobre, 28% indio, 10% galio y 53% selenio. Los *CdTe* son compuestos inorgánicos, generalmente cadmio en mezcla con azufre que reacciona para generar el Sulfuro de cadmio (*Cds*) y con telurio resultando telurio de cadmio, el Cuadro 5 muestra los materiales que componen cada una de las capas [28].

**Cuadro 5.** Materiales que componen cada una de las capas de los paneles de película delgada [28].

No. de capa	Nombre de la capa	Materiales de composición	Componentes químicos
1	Vidrio protector	Vidrio templado sosa	Sodio, cal, sílice, hierro.
2	El encapsulante	Polímero de Etil-Vinil-Acetato (EVA)	Etileno, acetato de vinilo.
3	Celdas solares e interconexiones metálicas	Cintas metálicas	Selenio, galio, indio, plata, cadmio, telurio.
4	Cubierta posterior	Láminas de aluminio	Aluminio.
5	Marco (no en todos los modelos)	Aluminio anodizado	Aluminio.

## 2.3 Disposición final de paneles fotovoltaicos

La Figura 6 muestra el ciclo de vida general de un panel solar, siendo la disposición final su última etapa. Al ser la última etapa del producto los materiales que, a pesar de haber pasado por procesos de separación, reciclaje, tratamiento y transformación no pueden ser nuevamente utilizados y deben ser dispuestos de manera adecuada y controlada para no perjudicar el ambiente [29] cumpliendo las normativas respectivas al país y teniendo en cuenta que se clasifican como residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) [30].

La separación de las partes que conforman un panel solar es importante, para evitar una disposición final sin tratamiento o rescate previo y este, a su vez, debe comprender la composición de las celdas fotovoltaicas. Los diferentes tipos de paneles pueden contener niveles variables de sustancias peligrosas que deben considerarse durante la manipulación y el procesamiento [18]. Los

principales procedimientos de separación son manual, mecánica, magnética y trituración e incineración en altas temperaturas. Cuando son componentes tóxicos o de carácter peligroso se tratan por medio de lixiviación ácida y electrólisis. Los volúmenes de recuperación de materiales de los paneles de silicio son del 96% y los de pérdida son del 4%, mientras que para los paneles de película delgada son del 98% y 2%, respectivamente [28].

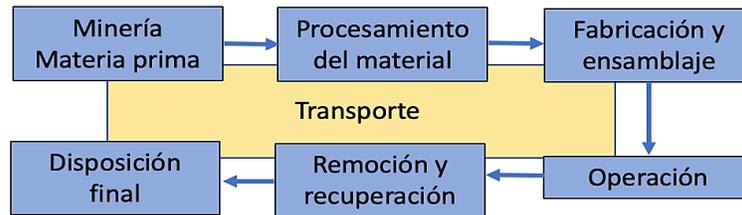


Fig 6. Etapas de un ciclo de vida para paneles fotovoltaicos [31].

#### a. Separación de paneles de silicio

En el Cuadro 6 y Figuras 7 y 8 se muestran los procesos en base a las estructuras normativas y alternativas técnicas implementadas por la Unión Europea y países como Reino Unido, Alemania y España, que fueron reunidos en el estudio sobre análisis y propuesta para la disposición final de paneles solares y fotovoltaicos en Colombia publicado por Agudelo en el 2018[12].

Cuadro 6. Proceso de desmantelamiento de las partes de los paneles de silicio [32].

Parte	Método	Procedimiento
Caja de conexiones	Mecánico	a. Desprender la caja de conexiones de la cubierta posterior. b. Pesar la caja de conexiones y el cableado.
Marco metálico	Mecánico	a. Cortar las cuatro uniones de las esquinas del panel. b. Desprender el marco de la cubierta posterior. c. Pesar las cuatro (4) piezas que conforman el marco.
Vidrio	Mecánico	Remover manualmente el vidrio.
Cubierta posterior	Térmico	Colocar el panel dentro del horno, con la termocupla se mide que la pieza llegue a 150 °C. Cuando esto sucede, se separa la cubierta posterior desde el lado más frágil y/o donde se encuentre alguna parte pelada para iniciar su remoción.
Cubierta frontal	Térmico	Colocar el panel dentro del horno, con la termocupla se mide que la pieza llegue a 150 °C. Cuando esto sucede, con una pinza, una cuchilla y un alicate de punta plana se levanta la cubierta frontal separándola del vidrio.
Celdas	Vibración	a. Separar las celdas solares del polímero EVA por medio una cama vibratoria, quedando separados pero las celdas con algunos restos de EVA. b. Triturar en pedazos de 4-5 mm con el fin de llevarlo a los procesos fisicoquímicos.
Contacto metálico presente en las celdas fotovoltaicas	Mecánico	Extraer los contactos de aluminios de la superficie remanente de la cubierta frontal.

Posterior a las separaciones térmicas y mecánicas se realizan procesos de pirolisis y gasificación sobre las capas de polímeros Etil-Vinil-Acetato (EVA), generando gases, aceites y cenizas a las cuales se realizan más procesos de lixiviación ácida con altas temperaturas, electrólisis y para realizar una separación de silicio cristalino, iones metálicos y contaminantes [28]. En la Figura 8 y el Cuadro 7 se explican estos tipos de procesos.

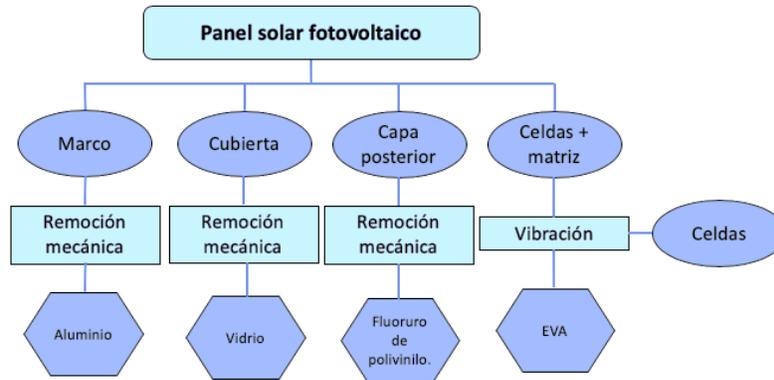


Fig 7. Proceso de desmantelamiento, tratamiento y disposición final de un panel fotovoltaico de silicio [12]

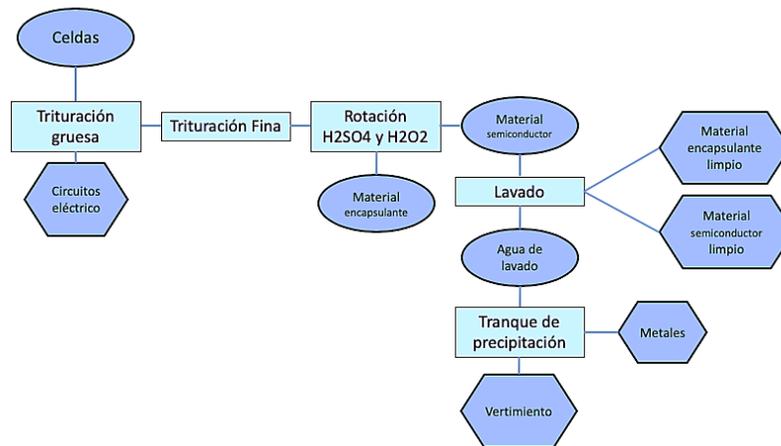


Fig 8. Proceso de desmantelamiento, tratamiento y disposición final de una celda [12].

Cuadro 7. Procedimientos fisicoquímicos posteriores al desmantelamiento en un panel.

Proceso	Material que separa	Procedimiento
Pirólisis en continuo con gasificación	Polímero EVA y celdas de silicio	Por medio de calor y con presencia controlada de oxígeno, se produce la degradación de materiales en estado líquido o sólido, reduciendo el volumen del residuo convirtiéndolo en gas o combustible, exceptuando vidrio y metales [34]. Después de que las celdas han pasado por este proceso quedan gases, gas-aceite y cenizas de silicio cristalino.
Lixiviación ácida ( $H_2SO_4$ y $H_2O_2$ )	Cenizas de silicio cristalino	Con un disolvente líquido (ácido), el material en estado sólido pulverizado disuelve uno de sus componentes [33]. Este procedimiento es implementado para la separación de iones metálicos del silicio como cadmio y plomo [28]. Se almacena el silicio purificado como materia prima para uso en la industria de la metalurgia [32].
Electrólisis	Solución con metales contaminantes	Separación de sustancias sumergidas en una disolución, a través de corriente eléctrica continua [33]. Con este paso se recuperan los iones metálicos separados del silicio que quedan en la solución luego de la lixiviación [32].

### b. Separación de paneles de película delgada

Estos equipos se tratan como una sola unidad, en este no existen separación de partes. Iniciando con la trituración completa del módulo en trozos y pasando por un molino de martillo para hacer trozos más finos (de 4 a 5 mm) facilitando la separación entre el vidrio y el laminado o cubierta posterior. El material triturado es llevado a un baño ácido de peróxido de hidrogeno, allí se separa el vidrio y material laminado y, los metales quedan en solución en el ácido. El líquido rico en metal se precipita y forma una torta rica en estos compuestos que posteriormente es vendida. Simultáneamente el vidrio y material laminado pasan por un tamiz vibratorio y, finalmente, son separados, como última forma el vidrio es lavado con agua para eliminar los residuos adheridos de material laminado [27]. En la Figura 9 se muestra el proceso de separación.

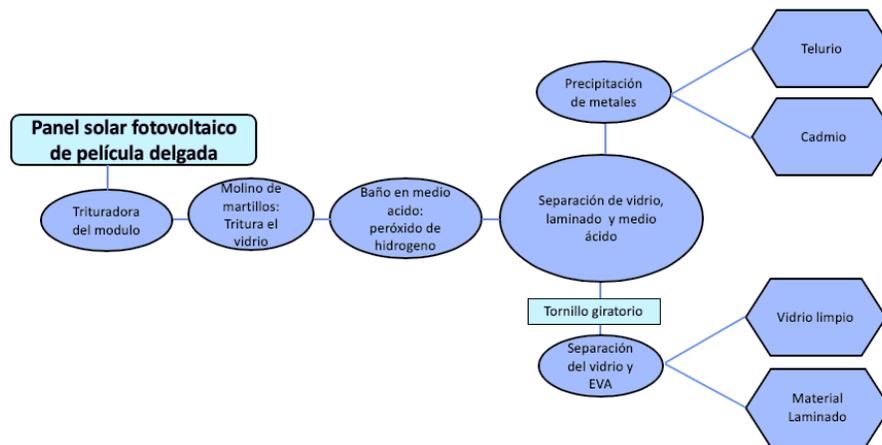


Fig 9. Proceso de desmantelamiento, tratamiento y disposición final de un panel de película delgada [27].

En el año 2016, una fundación creada en 2007, denominada PV Cylce, especializada en residuos de módulos fotovoltaicos de acuerdo con las normativas de la Unión Europea, logró reciclar el 96% de un panel de silicio [35]. Así mismo, de un panel solar de silicio se puede recuperar 96% vidrio, 100% aluminio, 80% de los módulos que sostiene las celdas solares unidas y 85% de las obleas de silicio [32], además, los paneles de película delgada el vidrio se reutiliza en un 90% y el material semiconductor de la celda (*CdTe* o *CIGS*) un 95% [34]. Es de tener en cuenta que implementar materiales reciclados en un panel solar, contribuye en un 50% con la reducción del consumo de energía en la manufactura [30].

## 2.4 Impacto de los materiales implementados en las celdas fotovoltaicas al ambiente

Al momento de disponer de los paneles o darles uso nuevamente, estos pueden afectar notoriamente los ecosistemas, seres vivos o al medio ambiente, si no se realiza de forma correcta. En los Cuadros 8 y 9 se relacionan las principales afectaciones derivadas de los dos tipos de paneles solares. Igualmente, los procesos físico-químicos que se realizan posteriores a la separación manual y mecánica presentan afectaciones a los ecosistemas y es este uno de los pasos donde se puede llegar a considerar la viabilidad de la recuperación de las celdas fotovoltaicas, considerando los siguientes impactos ambientales ocasionados por los procesos físico-químicos:

- *Electrólisis*, separa la solución con metales contaminantes. La electrólisis es un método que se ha aplicado para la recuperación del medio ambiente a través de los diferentes tipos de disoluciones

que hay, es por eso que de los tres (3) métodos este el de menor impacto para el ambiente en el caso de recuperación de los metales tóxicos provenientes de la lixiviación [38].

- *Lixiviación ácida*, separa las cenizas de silicio cristalino. Actualmente esta técnica para las cenizas de silicio cristalino no cuenta con suficiente estudio a profundidad para la afectación al medio ambiente y la salud humana [40], pero para los casos como la lixiviación en el proceso del oro, cobre o bacteriana suele contaminar cuerpos de agua severamente [39].
- *Pirólisis en continuo con gasificación*, la cual separa el polímero EVA y las celdas de silicio. Esta técnica a pesar de maneja de manera casi nula o en proporciones pequeñas la concentración de oxígeno, genera productos de combustión incompleta, dioxinas y furanos cuando es aplicada a escala comercial, los cuales son contaminantes para el ambiente [41], estos furanos y dioxinas pueden afectar el sistema inmune de los humanos y desarrollar cáncer; igualmente cuando son liberados a la atmosfera se depositan en suelos y vegetación, por su tamaño minúsculo son insolubles en el agua y logran acumularse en organismos y alimentos [40].

**Cuadro 8.** Principales impactos ambientales de los materiales utilizados en los paneles de silicio [28][32].

Capa	Material	Impacto ambiental
Celdas solares policristalinas e interconexiones metálicas	Silicio	El silicio es el material de mayor porcentaje que se encuentra en las celdas de paneles policristalinos y monocristalinos; no se disuelve bien en el agua, pero al estar expuesto al aire libre puede generar material particulado con un nivel de toxicidad bajo.
	Plomo	Puede generar lixiviados al contacto con el agua, afectando ecosistemas, porque queda en el suelo y/o en cuerpos de agua. En animales y humanos afecta el sistema nervioso, cardíaco y respiratorio, en concentraciones altas puede causar la muerte.
Caja de conexiones	Caja de conexiones	La disposición en un relleno es muy difícil después de la compactación, sin embargo, es posible un co-procesamiento (convertirlo en materia prima o combustible de un proceso industrial específico)
Marco	Aluminio	Este material no contamina ya que puede ser reciclado y reutilizado, vendido como elemento de baja calidad por sufrir deformaciones al momento de la separación. Sin embargo, la cubierta posterior contiene en algunos casos flúor que en tratamientos térmicos puede desprender emisiones.
Vidrio protector	Vidrio	El vidrio es un material que puede ser vendido como materia prima, posterior al proceso queda triturado como calcín (fragmentos de aproximadamente 4 mm de longitud de vidrio reciclado).
El encapsulante	Polímero (EVA)	Por su difícil desprendimiento de la cubierta posterior, es complejo llevar a cabo su tratamiento, sin embargo, es un material fácil de reciclar y reutilizar cuando está libre, clasificándose como plástico. En algunos casos ha sido recomendado probar termoplásticos que faciliten la separación del material.

## 2.5 Normativa legal de disposición final de paneles solares

Los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos conocidos como RAEE fueron definidos en el Real Decreto de España 110/2015 del 20 de febrero [30]. Igualmente, el consejo y el parlamento europeo en 2003 instauraron la directiva 2002/96, que para el año 2012 fue modificada por la Comisión Europea a la directiva 2012/19. Esta directiva busca proteger el medio ambiente y la salud de los seres humanos mitigando y previniendo los impactos adversos de la generación y gestión de los RAEE. La normativa inicia con una separación especial en la fuente que aplica también para paneles fotovoltaicos, donde los usuarios pueden devolver el producto finalizada su vida útil con la ayuda de un sistema de recolección dada por su proveedor y finaliza con un índice mínimo de recolección anual estipulado para el 2019 en 65% del promedio anual del peso de aparatos eléctricos

y electrónicos introducidos en el mercado y, el 85% si son hechos en el mismo territorio donde se comercializan siempre y cuando los países o estados cuenten con la infraestructura para el proceso [12].

**Cuadro 9.** Principales impactos ambientales de los materiales utilizados en paneles de película delgada.

Capa	Material	Impacto ambiental
Celdas solares de película delgada CIGs e interconexiones metálicas	Selenio	Con un 53% es el material de mayor porcentaje en los paneles de películas delgadas CIG. Una gran exposición en el aire puede generar en el ser humano mareos y fatiga; en contacto con el agua puede formar ácido de selenio. Sin embargo, esto no genera grandes afectaciones a los seres vivos ni ecosistemas, ya que las reacciones con diferentes sustancias no son estables en el tiempo [37].
	Cobre	La exposición de cobre para la salud humana no presenta mayor riesgo, sin embargo, cuando este se concentra en grandes cantidades en el suelo afecta el crecimiento de plantas, volviendo el suelo infértil, igualmente cuando un animal ingiere el cobre por estar presente en las plantas, puede ser mortal [37].
	Galio	El galio puro no presenta riesgos para el ser humano, sin embargo, cuando se presenta en compuestos puede afectar la salud, como dificultad en la respiración o dolores de cabeza. El galio afecta cuerpos de agua cuando su concentración es elevada, pues se requiere sustancias radioactivas para su separación [37].
	Indio	Altamente tóxicos para la salud humana, pero no han sido investigados los efectos que puedan presentarse al medio ambiente [37].
Celdas solares de película delgada CdTe e interconexiones metálicas	Cadmio	Es un metal pesado de mayor porcentaje en las celdas de paneles de película delgada CdTe, este material es cancerígeno tanto para animales y personas en concentraciones de 50 mg/hora puede ser mortal, igualmente al contacto con agentes corrosivos o ácidos genera lixiviados, afectando ecosistemas.
	Telurio	La inhalación de telurio puede causar afectaciones en el sistema nervioso central y su ingestión dolor abdominal, estreñimiento y vomito [37].
Caja de conexiones	Caja de conexiones	La disposición en un relleno es muy difícil después de la compactación, sin embargo, es posible un co-procesamiento (convertirlo en materia prima o combustible de un proceso industrial específico) que genera una alta carga ambiental [32].
Marco y cubierta posterior	Aluminio	Este material no contamina ya que puede ser reciclado y reutilizado, vendido como elemento de baja calidad por sufrir deformaciones al momento de la separación. Sin embargo, la cubierta posterior contiene en algunos casos flúor que en tratamientos térmicos puede desprender emisiones.
Vidrio protector	Vidrio	El vidrio es un material que puede ser vendido como materia prima, posterior al proceso queda triturado como calcín (fragmentos de aproximadamente 4 mm de longitud de vidrio reciclado).
Encapsulante	Polímero (EVA)	Por su difícil desprendimiento de la cubierta posterior, es complejo llevar a cabo su tratamiento, sin embargo, es un material fácil de reciclar y reutilizar cuando está libre, clasificándose como plástico. En algunos casos ha sido recomendado probar termoplásticos que faciliten la separación del material.

## 2.6 Ventajas y desventajas de los materiales de las celdas fotovoltaicas

Las principales ventajas del uso de los paneles fotovoltaicos se tienen:

- Los paneles de película delgada pueden reciclar un 98% de sus materiales.

- Los paneles de silicio policristalino pueden reciclar un 96% de sus materiales.
- La vida útil de un panel es aproximadamente 30 años, lo que da un lapso de tiempo bastante amplio para que los países logren incorporar la infraestructura suficiente para su reciclaje y reutilización.
- El procedimiento de reciclaje de los paneles delgados es más corto en número de etapas que el de silicio policristalino, reduciendo tiempo y energía.
- La separación de los materiales de paneles de silicio no demanda numerosas fases, inician con separación mecánica y manual, seguida por separación a altas temperaturas y finaliza con lixiviación y/o electrolisis.
- Se siguen investigando nuevos materiales que puedan conformar la celda fotovoltaica, como los paneles de celdas orgánicas, que presentan disminución de costos y menor impacto al medio ambiente [43].
- Reciclar materiales como el Galio y el Indio pueden ser favorables para la industria fotovoltaica, pues su extracción implica altos costos [12].
- Implementar materiales reciclados en un panel solar ayuda a disminuir el consumo de energía en la manufactura en un 50% [32].

Entre las principales desventajas del uso de los paneles fotovoltaicos se tienen:

- Los paneles de película delgada presentan metales como el cadmio en sus celdas fotovoltaicas, los cuales son metales pesados altamente tóxicos para el ser humano y el medio ambiente.
- En los paneles de silicio policristalino se implementa el plomo el cual es un metal de toxicidad alta que puede llegar a afectar la salud de las personas y el medio ambiente, este no puede ser recuperado y debe ser tratado como material altamente peligroso.
- Las nuevas investigaciones que buscan reemplazar los paneles policristalinos y de película delgada aún deben mantenerse en el constante mejoramiento de la eficiencia de los paneles de celdas orgánicas, pues estos aun presentan eficiencias del 8,3% [43].
- Los procesos físico-químicos que se realizan posterior al desensamble de los paneles en algunos casos pueden presentar afectaciones al ambiente, sin embargo, para el proceso de lixiviación los estudios aún no han sido hechos a profundidad, donde se pueda evaluar y deducir los impactos al ambiente y la salud humana conociendo que en la industria de la metalurgia este proceso puede contaminar cuerpos de agua [42].
- Finalizada la vida útil del panel algunas sustancias que se encuentran en el panel pueden degradarse al punto de ser tóxicas y corrosivas, pudiendo degenerar el panel a un punto donde el reciclaje no sea aceptable y sea necesario clasificarlo de carácter peligroso [12].

A modo de cierre, se puede observar el crecimiento exponencial que tiene la industria de celdas fotovoltaicas a nivel mundial, impulsada mayormente por las políticas e incentivos para la generación de energía en base a fuentes renovables. Sin embargo, no se han establecidos planes de tratamiento y disposición final de sus partes o componentes, a pesar de ser considerado en algunas legislaciones como desechos peligrosos [12] [30]. Entre las principales ventajas de los paneles, tanto de silicio como de película delgada, que por encima del 96% de sus materiales se puede reciclar, disminuyendo el consumo de energía dedicada a su manufactura en al menos un 50%. Sin embargo, entre los materiales se encuentran el cadmio y plomo que son metales tóxicos para el ser humano y el medio ambiente, pudiendo degenerar el panel a un punto donde el reciclaje no sea aceptable y sea necesario clasificarlo de carácter peligroso.

### 3. Conclusiones

Los paneles fotovoltaicos son una energía renovable que está mitigando la producción de gases de efecto invernadero, principalmente el dióxido de carbono  $CO_2$ . Con esta tecnología la producción de electricidad puede ser individual al tiempo que reduce costos y permite al usuario independizarse de la red eléctrica, siendo los más implementados en el mercado internacional los paneles de silicio policristalino y los paneles de película delgada.

La duración de un panel solar en promedio está entre 25 a 30 años, sin embargo, esta duración resulta de la calidad del módulo solar dependiente de la empresa que lo ha fabricado y de los materiales usados. Los materiales implementados en los paneles son materiales de fácil acceso y recuperación, siendo estos el vidrio, las láminas de aluminio y los polímeros, los cuales se clasifican como residuos de manejo especial tipo RAEE, recuperándose el 96% de material en los paneles policristalinos y el 98% de material en paneles de película delgada, alcanzando en general un 90% de recuperación y reutilización de los componentes para nuevos procesos industriales.

A pesar del alto porcentaje de recuperación, con el polímero EVA no se logra su separación en un 100% del vidrio y, materiales como el cadmio y plomo (presentes en la celda solar) manejan toxicidad de alto riesgo, ocasionando que se manipulen como materiales peligrosos para evitar que generen daños en el ambiente, siendo en general la materia de mayor peligrosidad de los paneles.

Como conclusión también se tiene que los procesos de aprovechamiento y desensamble de los paneles vienen dados por separación manual y mecánica para las partes de mayor tamaño como lo son el cableado, el vidrio y los marcos; el proceso que incluye temperatura sirve para recuperar y separar las partes de las celdas fotovoltaicas como el silicio y los metales de alta toxicidad.

Cabe destacar que la comunidad europea lidera la política RAEE para que los paneles solares se aprovechen al máximo en términos de reciclaje y reintegración, motivado a que en ella se estructuran modelos post consumo, involucrando las fases del ciclo de vida de un panel y garantizando que la mayor parte del material quede dispuesta de manera correcta.

Finalmente, los paneles siguen siendo una energía renovable y sostenible para el medio ambiente, al igual que reducen los gases, consiguen que menos del 4% de los materiales no sean reciclados.

### Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al Máster en Energías Renovables y Sostenibilidad Energética (MERSE) de la Universidad de Barcelona (UNIBA), España, por el apoyo institucional recibido en el desarrollo del trabajo de grado, ya concluido, del cual se derivó la presente publicación.

### Referencias

- [1] J. Cabrera y Y. Betancourt, Marcos regulatorios, políticas y estrategias de promoción de las fuentes renovables de energía. Experiencia internacional acumulada, *Economía y Desarrollo*, 158(2):151-168, 2017. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S0252-85842017000200011&script=sci\\_arttext&tlng=pt](http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S0252-85842017000200011&script=sci_arttext&tlng=pt)
- [2] L. Sánchez, C. Vásquez, A. Viloria y C. Meza-Estrada, Conglomerates of Latin American countries and public policies for the sustainable development of the electric power generation sector, *Data Mining and Big Data*. DMBD 2018. Lecture Notes in Computer Science book series, 10943:759-766, 2018. DOI [https://doi.org/10.1007/978-3-319-93803-5\\_71](https://doi.org/10.1007/978-3-319-93803-5_71)
- [3] C. Pérez, Normas y políticas públicas destinadas al crecimiento de las energías renovables en Chile, *Revista de Derecho Ambiental*, (14):9-41, 2020. DOI: 10.5354/0719-4633.2020.54038

- [4] A. Stuhldreher y V. Morales, Energía y cambio climático en el Mercosur: desafíos de la articulación de políticas de desarrollo sostenible, *Análisis Político*, 33(99):41-60; 2020. DOI: <https://doi.org/10.15446/anpol.v33n99.90937>
- [5] I. Rojas-Hernández y F. Lizana, Tiempo de recuperación de la energía para sistemas fotovoltaicos basados en silicio cristalino en Costa Rica, *Energética*, 39(3):195-202, 2018. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1815-59012018000300007](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012018000300007)
- [6] G. Berrios, A. Rivalora y A. Arena, Evaluación comparativa de turbinas eólicas de gran potencia empleando metodología de análisis de ciclo de vida, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente (AVERMA)*, 13:131-137, 2009. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/97731>
- [7] IRENA International Renewable Energy Agency, Solar Energy, 2011-2019. <https://www.irena.org/solar>
- [8] A.X. Males Ramos. Análisis comparativo de las principales tecnologías de la Energía Solar Fotovoltaica: Alcance comercial, aplicaciones y retos. Repositorio de la Universidad Abierta y a Distancia, Colombia, 2021. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/40460>
- [9] M. Ruiz Escudero. Una mirada al futuro del reciclaje de paneles fotovoltaicos en España. *Ingemecánica*, publicación técnica, 2020, <https://www.ingemecanica.com/tutoriales/objetos/publicaciones/publicacion23.pdf>
- [10] C. Robles y O. Rodríguez Álvarez, Un panorama de las energías renovables en el Mundo, Latinoamérica y Colombia, *Revista Espacios*, 39(34):10, 2018. <https://www.revistaespacios.com/a18v39n34/a18v39n34p10.pdf>
- [11] L. Sánchez, M. Lucena y C. Vásquez, Emisiones de mercurio por uso de las lámparas fluorescentes compactas y por generación de energía eléctrica a base de combustibles fósiles, *Revista Científica ECOCIENCIA*, 4(5):1-18, 2018. DOI: <https://doi.org/10.21855/ecociencia.45.51>.
- [12] A. R. Agudelo, Análisis y propuesta para la disposición final de paneles solares fotovoltaicos en Colombia, 2018. <https://repository.eia.edu.co/handle/11190/2240>
- [13] G. Lamas, Las sombras de la energía solar fotovoltaica, *Revista Perspectivas Metodológicas*, 20:e3046, 2020. <http://revistas.unla.edu.ar/epistemologia/article/view/3046/1661>
- [14] IRENA International Renewable Energy Agency, Solar Energy, 2011-2019. <https://www.irena.org/solar>
- [15] J. Roca, Las 20 mayores plantas fotovoltaicas del mundo, *El periódico de la energía*, 18/05/2020. <https://elperiodicodelaenergia.com/las-10-mayores-plantas-fotovoltaicas-del-mundo/>
- [16] L. Merino, ¿Por qué la mayoría de fabricantes de paneles solares ofrecen garantías de 15 años de producto y 25 de producción?, *Energías Renovables: el periodismo de las energías limpias*, 20/01/2020. <https://www.energias-renovables.com/fotovoltaica/por-que-la-mayoria-de-fabricantes-20200120>
- [17] Sol Energy, Paneles Solares, Celdas Solares, 2020. <https://www.solenergy.mx/es/paneles-solares>
- [18] S.Weckend, W.Andreas y G.Heath. End of life management: solar photovoltaic panels. United States: U.S. Department of Energy Office of Scientific and Technical Information, N. p., 2016. Web. doi:10.2172/1561525.
- [19] ADN Solar Energías Renovables, Panel Solar Policristalino 340W 24V 72 celdas RENOGEN, 2020. <https://adnsolar.com.ar/producto/panel-solar-policristalino-340w-24v-72-celdas-renogen/>
- [20] F. Hernández, Estudio comparativo de los sistemas fotovoltaicos con inyección a la red monocristalino, policristalino y amorfo instalados en CEL. Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de: Ingeniero Electricista, Universidad de El Salvador. 2013. <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/3718/>
- [21] Solivo Energy Systems, Sistemas solares de alta eficiencia, 2020. <http://solivoenergy.com>.
- [22] Panel Solar Perú, Panel Solar Perú 300W Monocristalino, 2020. <https://www.panelsolarperu.com/24-monocristalino>
- [23] SDE Solar Depot, Tipos de celdas solares, 2020. <http://www.sde.mx/tipos-de-celdas-solares/>
- [24] Energías solar fotovoltaica, Paneles Solares fotovoltaicos de capa delgada, 2020. <https://energiasolarfotovoltaica.org/paneles-solares-fotovoltaicos-de-capa-delgada>
- [25] Energías Renovables, Tipos de paneles fotovoltaicos, 2020. <http://www.energiasrenovablesinfo.com/solar/tipos-paneles-fotovoltaicos/>

- [26] Área Tecnología, Paneles Solares, 2020. <https://www.areatecnologia.com/electricidad/paneles-solares.html>
- [27] Fundación Chile, Tecnología Fotovoltaica de CdTe de First solar: evaluación seguridad, 2013. [http://www.firstsolar.com/-/media/First-Solar/Sustainability-Documents/Sustainability-Peer-Reviews/ES-First-Solar-Peer-Review-CENER\\_FCh\\_Espanol\\_Informe\\_Final.ashx](http://www.firstsolar.com/-/media/First-Solar/Sustainability-Documents/Sustainability-Peer-Reviews/ES-First-Solar-Peer-Review-CENER_FCh_Espanol_Informe_Final.ashx)
- [28] J. Chaparro Pérez, Manejo integral de residuos generados por los paneles solares fotovoltaicos en Colombia, Trabajo de grado para optar a Especialista en Planeación Ambiental y Manejo Integral de los Recursos, Universidad Militar Nueva Granada, Colombia. 2019. <https://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/32081>
- [29] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia. Disposición final de SAO, 2020. <http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/265-plantilla-asuntos-ambientales-y-sectorial-y-urbana-sin-galeria-28>
- [30] Fundación ECOLEC, ¿Qué son los RAEE?: definición de los RAEE, 2020.: <https://www.ecolec.es/informacion-y-recursos/sobre-los-raee/>
- [31] I. Rojas Hernández, F. Lizana Moreno. Tiempo de recuperación de la energía para sistemas fotovoltaicos basados en silicio cristalino en Costa Rica, *Energética*, 39(3), 2018 [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1815-59012018000300007#f1](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012018000300007#f1)
- [32] N. Bonilla Gámez, Análisis del ciclo de vida del proceso de recuperación de un panel fotovoltaico de silicio policristalino en Costa Rica, Proyecto Final de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Ambiental, Instituto Tecnológico De Costa Rica, 2016. <https://core.ac.uk/download/pdf/61001739.pdf>
- [33] EcuRed, 2020. <https://www.ecured.cu/Lixiviación>
- [34] GAIA, Gasificación y pirólisis de residuos: procedimientos de alto riesgo y baja rentabilidad para el tratamiento de residuos, 2017. <https://www.no-burn.org/wp-content/uploads/Gasificaci%C3%B3n-y-pir%C3%B3lisis-2017-ESP.pdf>
- [35] PV Cycle, Anual Report 2016, 2016.
- [36] Energía Solar Fotovoltaica, Reciclado de paneles solares fotovoltaicos, 2020. <https://energiasolarfotovoltaica.org/reciclado-de-paneles-solares-fotovoltaicos>.
- [37] Lenntech, Propiedades químicas-efectos sobre la salud-efectos ambientales, 2020. <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/se.htm>
- [38] A. Riera, Soluciones electroquímicas para la mejora del medio ambiente, Universidad de Alicante, 1995. [https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/9417/CC\\_017\\_art\\_1.pdf](https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/9417/CC_017_art_1.pdf)
- [39] Lixiviación, Impacto ambiental de la lixiviación minera, 2008. <https://lixiviacion.com/2008/03/14/impacto-ambiental-de-la-lixiviacion-minera/>
- [40] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Dioxinas y Furanos (PCDD+PCDF), 2019. <http://www.prtr-es.es/Dioxinas-y-Furanos-PCDDPCDF,15634,11,2007.html>
- [41] Health Care Without Harm, Pirólisis, una técnica de tratamiento térmico no tradicional, Washington, DC, 2010.
- [42] E. Bellini, PV Magazine, 4 Diciembre 2019. <https://www.pv-magazine-latam.com/2019/12/04/evaluacion-de-la-lixiviacion-de-metales-de-modulos-fotovoltaicos-en-vertederos/>.
- [43] W.A. Chamorro Coral, S. Urrego Riveros. Celdas solares orgánicas, una perspectiva hacia el futuro, *Elementos*, 2(2):140-149, 2012. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5085362>

## Sobre los autores

### **María Mónica Sierra Céspedes**

Ingeniero de Petróleos. Graduada en Máster de Energías Renovables y Sostenibilidad Energética por la Universidad de Barcelona, Barcelona, España.

Correos: mariamonicasc@hotmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3905-4837>

### **Carmen Luisa Vázquez Stanescu**

Ingeniero Electricista, Magíster Scientiarum en Ingeniería Eléctrica, Doctora en Ciencias Técnicas. Tutora en el Máster en Energías Renovables y Sostenibilidad Energética del Centro Universitario Internacional de la Universidad de Barcelona (UNIBA), España.

Profesora jubilada de la Universidad Nacional Experimental Politécnica Antonio José de Sucre, Venezuela.

Correos: cvasquez@unexpo.edu.ve, carmenluisavasquez@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0657-3470>

[Perfil Google Scholar](#)

### **Rodrigo Ramírez-Pisco**

Ingeniero Electricista, Doctor en Ingeniería Eléctrica.

Profesor en el Centro Universitario Internacional de la Universidad de Barcelona (UNIBA), España.

Coordinador del Máster en Energías Renovables y Sostenibilidad Energética.

Director del Bachelor en Ingeniería de Organización Industrial de la Universitat Carlemany, Andorra.

Correos: rramirez@unibarcelona.com, rramirez@universitatcarlemany.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8648-3805>

[Perfil Google Scholar](#)

---

### **Forma de citar:**

M. Sierra Céspedes, C. Vázquez Stanescu y R. Ramírez-Pisco. Disposición final e impacto ambiental de las celdas fotovoltaicas. *Publicaciones en Ciencias y Tecnología*. 14(2): 74-90, 2020, <https://revistas.uclave.org/index.php/pcyt>