

Nota Técnica

19

A worker wearing a yellow hard hat, safety glasses, and an orange and white high-visibility vest is kneeling on a large array of solar panels. The worker is holding a walkie-talkie to their mouth. The solar panels are arranged in rows, and the background shows some greenery and a white container.

Oportunidades para la economía circular en la transición energética en América Latina y el Caribe

olacde
JUNIO 2026

Este documento fue preparado bajo la dirección de
Organización Latinoamericana y Caribeña de Energía
(OLACDE)

Andrés Rebolledo Smitmans

Secretario Ejecutivo

Elaborado por

Fitzgerald Cantero Piali

DIRECTOR DE ESTUDIOS, PROYECTOS E INFORMACIÓN

Fabio García Lucero

Katherine Segura González

ESPECIALISTAS ASOCIADOS DIRECCIÓN ESTUDIOS, PROYECTOS E
INFORMACIÓN

David Delgado Noboa

CONSULTOR OLACDE

Y con la colaboración de:

Gastón Siroit,

ASESOR TÉCNICO DEL SECRETARIO EJECUTIVO DE OLACDE

y

Patricia Otero Valladares

COORDINADORA DE LA CARRERA EN ELECTRICIDAD DE LA ESCUELA
POLITÉCNICA NACIONAL DEL ECUADOR Y MIEMBRO DEL GRUPO DE
INVESTIGACIÓN DE SCINERGY

Quito, Ecuador

Junio de 2026

Contenido

1.	Introducción	1
2.	Reciclaje y disposición de residuos fotovoltaicos.....	2
2.1.	Información general de la estructura de los paneles fotovoltaicos	2
2.2.	Proyección de la cantidad de materiales presentes en los paneles fotovoltaicos en ALC.3	
2.3.	Algunos procesos para reciclaje y disposición de los materiales componentes de los módulos fotovoltaicos.....	3
3.	Reciclaje y disposición de materiales de baterías de ion-litio.....	5
3.1.	Información general de la estructura de las baterías de ion litio.	5
3.2.	Proyección de la cantidad de materiales presentes en las baterías de iones de litio usadas como respaldo del sistema de generación eléctrica y en electromovilidad en ALC 6	
3.3.	Procesos para disposición de los componentes de las baterías de iones de litio. 8	
4.	Disposición de residuos de aerogeneradores.....	9
4.1.	Información general de la estructura de los aerogeneradores.	9
4.2.	Proyección de la cantidad de materiales presentes en los aerogeneradores en ALC. 10	
4.3.	Procesos para disposición de los componentes de los aerogeneradores.	11
5.	Metodología para la estimación del valor económico recuperable de materiales provenientes de tecnologías de transición energética	12
5.1.	Diferencia entre valor teórico y valor recuperable	12
5.2.	Valor agregado regional y economía circular	13
5.3.	Alcances y limitaciones	14
5.4.	Cuantificación del valor económico recuperable de los materiales de paneles fotovoltaicos en ALC al 2050.....	14
5.5.	Cuantificación del valor económico recuperable de los materiales de baterías de litio en ALC al 2050.	15
5.6.	Cuantificación del valor económico recuperable de los materiales de aerogeneradores en ALC al 2050.	15
6.	Digitalización y análisis inteligente de datos para la economía circular en tecnologías energéticas	16
7.	Experiencias destacables en países de ALC, respecto a la disposición de residuos de la transición energética.....	18
8.	Conclusiones	21
9.	Referencias bibliográficas	23

Índices de tablas

Tabla 1. Cantidad de materiales contenidos en el parque solar fotovoltaico de ALC actual y proyectado.....	3
Tabla 2. Composición porcentual típica en peso de una batería de iones de litio.....	6
Tabla 3. Cantidad de materiales en peso presentes en los bancos de baterías de iones de litio instaladas como respaldo del sistema de generación eléctrica en ALC	7
Tabla 4. Cantidad de materiales en peso presentes en las baterías de iones de litio destinada a la electromovilidad en ALC.	7
Tabla 5. Cantidad total de materiales en peso presentes en las baterías de iones de litio en ALC.	8
Tabla 6. Composición en peso estimada de un aerogenerador terrestre, por unidad de potencia.....	10
Tabla 7. Cantidad total de materiales presentes en el parque generador eólico de ALC ..	11
Tabla 8. Valor económico recuperable del material presente en el parque generador fotovoltaico de ALC al 2050.....	14
Tabla 9. Valor económico recuperable del material presente en las baterías de litio en ALC al 2050.	15
Tabla 10. Valor económico recuperable del material presente en los aerogeneradores en ALC al 2050.	15

Índices de figuras

Figura 1. Composición porcentual en peso de un panel fotovoltaico promedio.	2
Figura 2. Métodos actuales de reciclaje de palas de los aerogeneradores.....	11

Tabla de siglas y acrónimos

<i>Sigla/Acrónimo</i>	<i>Descripción</i>
<i>ALC</i>	América Latina y el Caribe
<i>FV</i>	Fotovoltaico
<i>GEI</i>	Gases de efecto invernadero
<i>g/Wp</i>	Gramo por Vatio pico
<i>g/t</i>	Gramo por tonelada métrica
<i>GW</i>	Gigavatio
<i>GWh</i>	Gigavatio hora
<i>kt</i>	Kilotonelada métrica
<i>Li</i>	Litio
<i>t/MW</i>	Tonelada métrica por MW
<i>Wh/kg</i>	Vatios hora por kg

Oportunidades para la economía circular en la transición energética en América Latina y el Caribe (ALC)

1. Introducción

La transición hacia el mayor uso de fuentes de energía renovable, proceso en que se encuentran inmersos la mayoría de los países de ALC, significa sin duda una importante contribución a los esfuerzos globales de mitigación del cambio climático y está generando beneficios tangibles en cuanto a reducción de Gases de Efecto Invernadero (GEI) del sector energético. Por ejemplo, al 2025, el 67.4% de la generación eléctrica de la región fue de origen renovable, con el 44% hidráulica, el 11% eólica, el 8% solar, el 4% bioenergética y el 0.4% geotérmica (sieLAC – OLACDE, 2025).

Sin embargo, las tecnologías utilizadas para el uso de este tipo de fuentes pueden involucrar impactos ambientales si se considera todo su ciclo de vida, desde su etapa de construcción hasta la etapa de disposición de sus residuos una vez culminada su vida útil. Esto se debe a que los diferentes dispositivos de transformación de energía están contruidos de materiales que pueden generar contaminación, como metales pesados, plásticos y sustancias corrosivas o tóxicas que afectan el suelo, el aire y el agua.

Si bien el auge del aprovechamiento de fuentes renovables no convencionales en ALC, es relativamente reciente - aproximadamente desde hace una década atrás - por lo que pocas instalaciones energéticas implementadas para este fin han cumplido su vida útil, algunos de los dispositivos utilizados, son desechados prematuramente, ya sea por averías o por renovación tecnológica, por lo que muchos países han empezado a diseñar planes, programas y a emitir regulaciones para el reciclaje de materiales reutilizables y la disposición de los residuos tecnológicos de dispositivos tales como paneles solares, aerogeneradores y baterías.

En la presente Nota Técnica, se hace un breve inventario actual y prospectivo de los materiales constitutivos de las tecnologías relacionadas con la transición energética¹, con el fin de presentar las oportunidades de reciclaje de materiales y necesidades de disposición ambientalmente responsable de los desechos finales en la región, una vez que las tecnologías involucradas en la transición energética agoten su vida útil.

¹ Las proyecciones de capacidad de cada tecnología corresponden a la prospectiva incluida en la última edición del Panorama Energético de América Latina y el Caribe 2025, para un escenario ambientalmente ambicioso que alcanza la condición Net 0 de la región el año 2050.

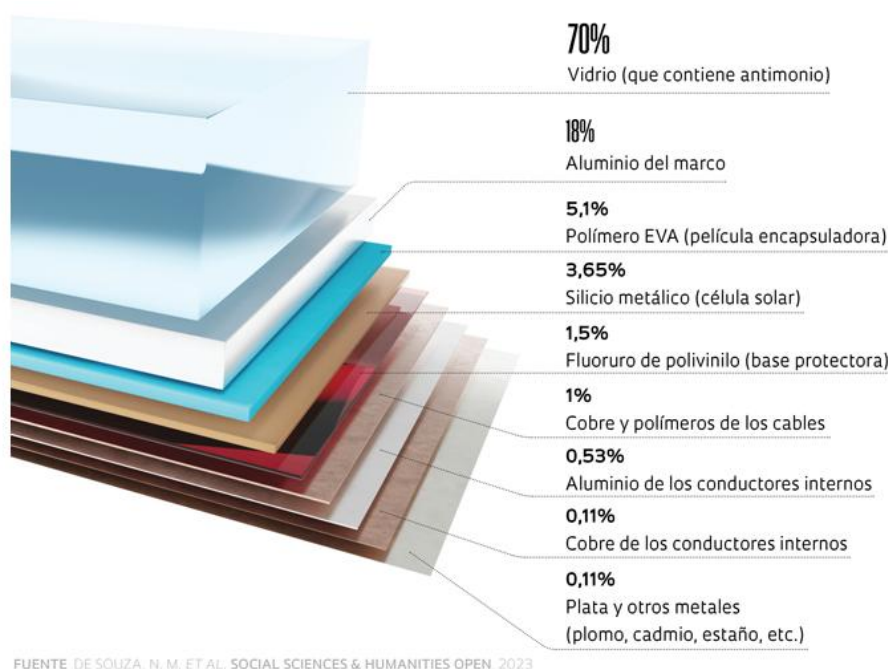
2. Reciclaje y disposición de residuos fotovoltaicos.

2.1. Información general de la estructura de los paneles fotovoltaicos

Los módulos fotovoltaicos de silicio cristalino constituyen la tecnología utilizada en prácticamente la totalidad de las centrales fotovoltaicas instaladas en ALC. Estos módulos están compuestos de diferentes materiales, donde el vidrio participa con un 78% en peso para el caso de módulos de una sola cara y con más del 86% para módulos de doble cara, pero además contienen metales como aluminio, plomo, plata, cadmio, cobre, algunos materiales plásticos y por supuesto, silicio. Si bien la mayoría de estos materiales son reciclables, la presencia de metales pesados como el plomo y el cadmio, los cuales son contaminantes del suelo y agua y perjudiciales para la salud, exige un procedimiento de desmantelamiento adecuado. Además, la recuperación incompleta de elementos reciclables significa desperdicio de energía embebida² y de recursos materiales y económicos. Cabe agregar que los paneles fotovoltaicos con la tecnología actual pueden alcanzar hasta 30 años de vida útil.

En la Figura 1. Se observa la composición de un panel fotovoltaico promedio como % de su peso.

Figura 1. Composición porcentual en peso de un panel fotovoltaico promedio³.



² Energía embebida en un producto es la cantidad de energía que se utilizó para elaborarlo, contada desde el procesamiento de las materias primas.

³ <https://revistapesquisa.fapesp.br/es/el-destino-de-los-paneles-solares-al-final-de-su-vida-util/>

2.2. Proyección de la cantidad de materiales presentes en los paneles fotovoltaicos en ALC⁴.

Para la proyección de materiales se utiliza como base la capacidad fotovoltaica instalada y proyectada para ALC (publicada en el Panorama Energético de ALC 2025 de OLACDE)⁵ y se asume un peso específico promedio de los paneles fotovoltaicos de silicio cristalino de 50 gr/Wp (gramos/vatio pico). A partir de estos supuestos, se calcula la cantidad de materiales involucrados en el parque fotovoltaico de la región para los próximos años, considerando que, una vez que dichas centrales agoten su vida útil, la región deberá tener la capacidad para reciclar los materiales reutilizables y disponer de los no reciclables, con el fin de evitar impactos ambientales y pérdidas de recursos. Los resultados se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Cantidad de materiales contenidos en el parque solar fotovoltaico de ALC actual y proyectado

	2025	2035	2050
Capacidad (GW)	90	192	426
<i>Aluminio (kt)</i>	833.9	1,778.9	3,946.9
<i>Polímeros (kt)</i>	297.0	633.6	1,405.8
<i>Cobre (kt)</i>	50.0	106.6	236.4
<i>Vidrio (kt)</i>	3,150.0	6,720.0	14,910.0
<i>Plata (kt)</i>	5.0	10.6	23.4
<i>Silicio cristalino (kt)</i>	164.3	350.4	777.5
Total (kt)	4,500.0	9,600.0	21,300.0

Fuente: elaboración propia.

2.3. Algunos procesos para reciclaje y disposición de los materiales componentes de los módulos fotovoltaicos.

Proceso de reciclaje de un Panel Solar

La patente de Jr Brandhorst et al, de Estados Unidos, cuya descripción se publicó en el documento “Informe de Vigilancia tecnológica – Reciclaje de Paneles Solares y Baterías”, del Instituto Nacional de Propiedad Industrial - INAPI de Chile (INAPI, 2024), consiste en un proceso limpio, seguro y eficiente para reciclar células y paneles solares, basado en termólisis, para eliminar materiales contaminantes como flúor y otros, mientras se recuperan materiales reciclables, convirtiendo las celdas y paneles solares en una fuente limpia de gas combustible y carbón. De acuerdo con este invento, el proceso consiste en los siguientes pasos:

- I. Introducir una fuente de residuos de panel solar y/o celda con presencia de polifluoroalifático en un sistema de termólisis conformado por reactor,

⁴ La capacidad instalada actual fotovoltaica en la región corresponde a aproximadamente 150 millones de paneles solares con una potencia pico promedio de 600 W por unidad.

⁵ Ver: https://www.olade.org/wp-content/uploads/2025/12/PANORAMA_ENERGETICO_DE_ALC_2025.pdf

- separador de petróleo/agua, craqueador de petróleo/alquitrán y depurador de gases;
- II. Despolimerizar y craquear hidrocarburos;
 - III. Escindir térmicamente el flúor de los compuestos polifluoroalifáticos;
 - IV. Capturar el flúor en los depuradores del sistema como gas de hidrógeno de flúor y convertirlo en sales de fluoruro para su eliminación;
 - V. Destruir y/o eliminar compuestos tóxicos presentes;
 - VI. Generar una fuente de gas combustible limpio y carbón que esté sustancialmente libre de compuestos orgánicos halogenados y no incluya alquitranes y/o aceites; y
 - VII. Recuperar metales reciclables y materiales fotovoltaicos y/o silicio.

Proceso de reciclaje del vidrio de los módulos solares

Esta patente de Giovanni Modica et al⁶ de Italia, publicada su descripción también en el informe del INAPI de Chile, se refiere a un método de reciclaje de restos de vidrio procedente de paneles fotovoltaicos agotados, que está sustancialmente libre de contaminantes orgánicos y de plomo, permitiendo obtener silicatos de sodio líquidos de grado industrial y silicatos inorgánicos mixtos insolubles en agua y en soluciones alcalinas.

El proceso también se refiere a silicatos solubles e insolubles obtenidos mediante dicho método. De acuerdo a la patente el método para reciclar restos de vidrio procedentes de paneles fotovoltaicos agotados comprende las siguientes etapas:

- I. Suministrar paneles fotovoltaicos agotados;
- II. Obtener restos de vidrio de los paneles fotovoltaicos agotados;
- III. Triturar los restos de vidrio;
- IV. Tratar los vidrios triturados con una solución acuosa de hidróxido de sodio, para obtener una fracción sólida y una fracción líquida;
- V. Separar la fracción sólida de la fracción líquida mediante filtración; y
- VI. Añadir a la fracción líquida agentes quelantes orgánicos o inorgánicos.

Método para recuperar materiales valiosos de módulo de células solares

La patente de Masaru Sasai et al de Japón descrita en el Informe de Vigilancia Tecnológica (INAPI,2024), proporciona un método para reciclar materiales valiosos desde un módulo fotovoltaico, que tiene una lámina posterior de resina o similar, recuperando así fácil y eficientemente estos materiales de valor y eliminando los componentes de resina del módulo fotovoltaico. De acuerdo con esta invención, el método comprende:

- I. Una etapa de carga de un módulo fotovoltaico que tiene una lámina posterior de resina y una capa de resina selladora sobre un cuerpo moldeado poroso resistente al calor con la superficie de la hoja posterior hacia abajo; y

⁶ El Prof. Dr. Ing. Giovanni Modica es un asesor científico sénior italiano, químico industrial e inventor prolífico que posee 35 patentes internacionales.

- II. Una etapa de calentamiento de la carga, que incluye el módulo fotovoltaico y el cuerpo moldeado poroso en un horno de calentamiento en una atmósfera oxidante para fundir y luego quemar los componentes de resina.

Además de eliminar sustancias tóxicas, los materiales reciclables recuperados de los paneles fotovoltaicos, como metales y vidrio, pueden servir de materias primas para la fabricación de nuevos paneles o diversos productos de la industria metalúrgica y vidriera.

3. Reciclaje y disposición de materiales de baterías de ion-litio.

3.1. Información general de la estructura de las baterías de ion litio.

Las baterías de iones de litio constituyen actualmente la tecnología predominante para el almacenamiento de energía en vehículos eléctricos y con las mayores expectativas para el almacenamiento de la electricidad, generada por centrales que aprovechan fuentes de energía intermitentes como la solar y la eólica, permitiendo almacenar la energía generada durante períodos de alta producción renovable para su posterior despacho cuando el sistema eléctrico lo requiera, mejorando la flexibilidad operativa e incrementando la integración de fuentes renovables variables..

Si bien, por su alto costo específico, la capacidad instalada en la región de ALC de este tipo de dispositivos destinado al respaldo de sistemas de generación eléctrica es todavía bajo de alrededor de unos 2 GW, las mejoras tecnológicas en cuanto a eficiencia, densidad de carga y vida útil, han producido una tendencia decreciente de sus costos, por lo que muchos países ya consideran en sus planes de expansión de sus sistemas de generación eléctrica, la implementación de un importante componente de bancos de baterías.

Sin embargo, las buenas expectativas en cuanto al avance en la electromovilidad y los sistemas de respaldo de la generación eléctrica renovable, trae también desafíos relacionados con la disposición de los residuos de las baterías de iones de litio, una vez culminen su vida útil, ya que en su composición existen materiales que pueden ser contaminantes para el ambiente y nocivos para la salud.

La composición química de una batería de litio depende del uso para el cual está destinada, por ejemplo, las baterías de óxido de litio y cobalto (LiCoO_2) son utilizadas, principalmente, en equipos electrónicos portátiles, mientras que las baterías de litio hierro fosfato (LiFePO_4) se destinan, mayoritariamente, a los autos eléctricos. De manera general una batería de iones de litio puede contener en su composición materiales como el Litio, Níquel, Cobalto, Manganeseo, Grafito, Hierro, Láminas de cobre y aluminio y el Electrolito que normalmente es inflamable.

Varios de los materiales presentes en las baterías de ion-litio, como litio, níquel, cobalto, cobre y grafito, son considerados minerales críticos para la transición energética global, por lo que su recuperación y reciclaje representan no solamente un desafío ambiental, sino también una oportunidad estratégica para fortalecer cadenas regionales de valor y reducir dependencia de materias primas importadas.

Una composición porcentual típica en peso de una batería de iones de litio se puede observar en la Tabla 2.

Tabla 2. Composición porcentual típica en peso de una batería de iones de litio.

Componente	Porcentaje	Función principal
Cátodo (óxidos metálicos)	25% - 35%	Almacena los iones de litio (la parte más cara).
Ánodo (grafito)	15% - 20%	Aloja los iones cuando la batería está cargada.
Carcasa y estructura (aluminio)	20% - 25%	Protección física y soporte estructural.
Cobre	10% - 15%	Colector de corriente en el ánodo.
Cátodo (aluminio)	5% - 10%	Colector de corriente en el cátodo.
Electrolito (sales de Li y solventes)	10% - 15%	Medio líquido que permite el flujo de iones.
Polímeros y separador	3% - 5%	Evita cortocircuitos internos.

Fuente: <https://bateriaslaspalmas.es/blog/56-baterias-de-ion-de-litio-funcionamiento-y-ventajas#:~:text=Componentes%20principales%20%C3%81nodo:%20Generalmente%20hecho%20de%20grafito%2C,de%20litio%20se%20mueven%20durante%20la%20descarga.>

3.2. Proyección de la cantidad de materiales presentes en las baterías de iones de litio usadas como respaldo del sistema de generación eléctrica y en electromovilidad en ALC

Baterías para respaldo a la generación eléctrica

Aunque la densidad energética gravimétrica de una batería de iones de litio es muy variable, dependiendo de su tipo y composición, una batería tipo litio hierro fosfato, que es la más comúnmente usada tanto en vehículos eléctricos como en unidades de generación eléctrica, está entre los 100 y 180 Wh/kg (Lee PAN, 2025), por lo cual se puede considerar un valor medio de 140 Wh/kg. Con los datos de la Tabla 2 y la prospectiva realizada por OLACDE, se calcula la cantidad de materiales presente en las baterías de litio específicamente destinadas al respaldo del sistema de generación eléctrica para los años 2025, 2035 y 2050, para los cuales, la región debería tener capacidad de reciclaje y disposición una vez dichos dispositivos finalicen su vida útil.

Cabe indicar que para el cálculo se considera que los bancos de baterías se cargan y descargan una sola vez al día (con 4 horas de descarga), por lo cual su capacidad de almacenamiento es la energía proporcionada anual dividida para 365 días en GWh. Los resultados del cálculo se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Cantidad de materiales en peso presentes en los bancos de baterías de iones de litio instaladas como respaldo del sistema de generación eléctrica en ALC

Cap. de almacenamiento / material	2025	2035	2050
<i>Cap. de almacenamiento (GWh)</i>	0.67	92.26	359.74
<i>Óxidos metálicos (kt)</i>	1.2	164.7	642.4
<i>Grafito (kt)</i>	0.8	112.0	436.8
<i>Cobre (kt)</i>	0.6	82.4	321.2
<i>Aluminio (kt)</i>	1.5	197.7	770.8
<i>Sales de litio y solventes (kt)</i>	0.6	82.4	321.2
<i>Polímeros (kt)</i>	0.1	19.8	77.1
Total (kt)	4.8	659.0	2,569.5

Fuente: elaboración propia.

Baterías para electromovilidad

Utilizando los datos de la Tabla 4, con la proyección de la energía consumida por la electromovilidad en ALC, obtenida de la prospectiva energética de OLACDE, con la consideración de parámetros característicos de las baterías del tipo Litio-Hierro-Fosfato como: densidad energética gravimétrica (140 Wh/kg), capacidad de almacenamiento de las baterías en buses y autos eléctricos y la proyección del número de vehículos electrificados en circulación en cada año del período 2025 – 2050, se calculó la cantidad en peso de cada uno de los componentes de las baterías utilizadas en electromovilidad para los años 2025, 2035 y 2050. Cabe resaltar que para el cálculo se consideró solamente los vehículos livianos 100% eléctricos (BEV) y los híbridos enchufables (PHEV) así como los buses 100% eléctricos, por considerar que son las tecnologías que brindan mayor aporte a la transición energética.

Tabla 4. Cantidad de materiales en peso presentes en las baterías de iones de litio destinada a la electromovilidad en ALC.

Número de baterías / material	2025	2035	2050
<i>Número de baterías (Millones de unidades)</i>	0.71	21.7	63.6
<i>Óxidos metálicos (kt)</i>	41.0	1,264.0	3,700.0
<i>Grafito (kt)</i>	28.0	860.0	2,516.0
<i>Cobre (kt)</i>	21.0	632.0	1,850.0
<i>Aluminio (kt)</i>	49.0	1,517.0	4,440.0
<i>Sales de litio y solventes (kt)</i>	21.0	632.0	1,850.0
<i>Polímeros (kt)</i>	5.0	152.0	444.0
Total (kt)	165.0	5,057.0	14,800.0

Fuente: elaboración propia.

Cantidad total de materiales en baterías de iones de litio en ALC

Sumadas las cantidades de materiales indicadas en las Tablas 3 y la Tabla 4, se obtiene las cantidades totales de materiales presentes en las baterías de iones de litio en ALC, las cuales se observan en la Tabla 5.

Tabla 5. Cantidad total de materiales en peso presentes en las baterías de iones de litio en ALC.

Material	2025	2035	2050
<i>Óxidos metálicos (kt)</i>	42.2	1,428.7	4,342.4
<i>Grafito (kt)</i>	28.8	972.0	2,952.8
<i>Cobre (kt)</i>	21.6	714.4	2,171.2
<i>Aluminio (kt)</i>	50.5	1,714.7	5,210.8
<i>Sales de litio y solventes (kt)</i>	21.6	714.4	2,171.2
<i>Polímeros (kt)</i>	5.1	171.8	521.1
Total (kt)	169.8	5,716.0	17,369.5

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con los cálculos anteriores, se observa que la mayor cantidad de baterías de iones de litio y de sus materiales constitutivos, se encuentra en el sector de la electromovilidad, las cuales sumadas a las correspondientes al sector de generación eléctrica, resultan en cantidades que irán creciendo de manera exponencial durante los próximos 25 años, por lo cual los países de la región deben estar preparados con programas de disposición ambientalmente amigable y de economía circular, una vez estos dispositivos culminen su vida útil.

3.3. Procesos para reciclaje de los componentes de las baterías de iones de litio.

El reciclaje de baterías de iones de litio es un proceso industrial complejo que consta de dos fases principales: el pretratamiento (recogida, transporte, desmontaje y trituración) y el tratamiento o refinado, donde se recuperan metales valiosos mediante procesos como la pirometalurgia y la hidrometalurgia. En la pirometalurgia se somete a los residuos a alta temperatura convirtiendo los residuos en gases, escoria y aleaciones metálicas, aunque requiere de gran cantidad de energía y posterior purificación, mientras que en la hidrometalurgia, se trata a los residuos con soluciones acuosas obteniendo como resultado la *black mass*, una mezcla rica en litio, cobalto, níquel y manganeso, además de otros materiales siendo el procedimiento preferido por su menor gasto energético, aunque incluso en países desarrollados como los europeos, este tratamiento sigue siendo limitado. También existe el método de reciclaje directo, donde se recuperan los materiales del cátodo y el ánodo sin alterar su estructura química original.

De los materiales recuperados de los procesos de reciclaje de los componentes de las baterías de litio, el principal aprovechamiento se da de las aleaciones metálicas en la industria metalúrgica y en la industria electrónica.

Segunda vida de las baterías de litio usadas en electromovilidad

Si bien previamente se ha analizado la cantidad y el tipo de materiales que deberán gestionarse, una vez que las baterías de iones de litio utilizadas en vehículos eléctricos alcancen el final de su vida útil, es importante señalar que, cuando estas baterías presentan un nivel de degradación que las hace inviables para continuar operando en aplicaciones de electromovilidad, generalmente aún conservan entre el 70 % y el 80 % de su capacidad nominal de almacenamiento.

Esta capacidad residual resulta suficiente para su reutilización en aplicaciones de almacenamiento estacionario de energía, tales como sistemas de respaldo para centrales eléctricas basadas en fuentes renovables intermitentes, como la solar y la eólica, sistemas de estabilización de redes eléctricas y unidades de alimentación ininterrumpida (UPS, por sus siglas en inglés). Asimismo, estas baterías pueden destinarse a otras modalidades de transporte eléctrico con menores requerimientos energéticos, como pequeñas embarcaciones fluviales, por ejemplo.

Esta segunda vida de las baterías de litio contribuye a extender su ciclo de vida total, permitiendo postergar la necesidad de gestión de sus residuos, además de reducir su costo nivelado.

Si bien la vida útil de las baterías no se mide en años sino en número de ciclos de carga y descarga, considerando un ciclo diario, una batería de iones de litio se estaría degradando entre 1 y 3% anual de su capacidad nominal (GridX, 2025). Si se toma el promedio 2% anual, significa que en 10 años perdería el 20% de su capacidad nominal y se podría considerar este período como su primera vida útil para su aplicación en electromovilidad, aunque es una estimación muy aproximada, debido a que depende de las diferentes condiciones de uso de la batería e inclusive de condiciones climáticas. El tiempo remanente para una segunda vida en sistemas estacionarios puede extenderse hasta cuando la batería llegue al 60% de su capacidad nominal, lo que podría representar 10 años adicionales.

4. Disposición de residuos de aerogeneradores⁷

4.1. Información general de la estructura de los aerogeneradores.

Los aerogeneradores son los dispositivos encargados de convertir la energía cinética del viento en energía eléctrica y están constituidos por tres componentes principales: la turbina o rotor, la góndola que alberga el generador eléctrico y la

⁷ La capacidad instalada actual eólica en la región corresponde a aproximadamente 16.000 aerogeneradores con una capacidad promedio de 4 MW por unidad.

torre o estructura de soporte. En cada uno de estos componentes aproximadamente entre el 85% y 90% son materiales reciclables, como el acero, el aluminio y el cobre, mientras que las palas de la turbina, fabricadas generalmente de fibra de vidrio o carbono y algunas resinas complejas, son desechadas y enviadas a los vertederos. Por esta razón los programas de disposición de residuos de los aerogeneradores están generalmente orientados al tratamiento del material de las palas y ya existen investigaciones sobre procesos que permitirían que, en un futuro próximo, el 100% de los materiales presentes en un aerogenerador, puedan ser reciclados. La vida útil de estos dispositivos, pueden alcanzar los 30 años.

La composición en peso de los materiales presente en los aerogeneradores es muy variable, dependiendo de la altura y el tipo de tecnología, sin embargo, el acero constituye entre el 70% y el 80% del peso total de estas máquinas y que un modelo típico terrestre de 3 MW de capacidad puede pesar entre 250 y 330 toneladas. En estos modelos la góndola pesa alrededor de 68 toneladas, la torre entre 155 y 235 toneladas y la turbina o rotor aproximadamente 30 toneladas. También se estima que este tipo de aerogeneradores, contienen entre 9 y 12 toneladas de cobre y hasta un 2% en peso de aluminio.

Con esta información se puede estimar valores por unidad de potencia de los principales componentes de un aerogenerador terrestre (*onshore*) típico los cuales se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Composición en peso estimada de un aerogenerador terrestre, por unidad de potencia.

<i>Material</i>	<i>t/MW</i>
Acero	90
Cobre	4
Aluminio	3
Fibra de vidrio/carbono y resinas	10
Total	107

Fuente: elaboración propia con base en diferentes fuentes de información

4.2. Proyección de la cantidad de materiales presentes en los aerogeneradores en ALC.

Con la información presentada en la Tabla 6 y considerando la proyección de capacidad instalada eólica realizada por OLACDE al año 2050⁸, se procede a calcular la cantidad de materiales presentes en el parque generador eólico de la región para los años 2025, 2035 y 2050. El resultado de este cálculo se presenta en la Tabla 7.

⁸ Panorama Energético (OLACDE 2050).

Tabla 7. Cantidad total de materiales presentes en el parque generador eólico de ALC

Capacidad/material	2025	2035	2050
Capacidad eólica (GW)	63.2	160.8	394.3
Acero (kt)	5,688.2	14,467.7	35,482.7
Cobre (kt)	252.8	643.0	1,577.0
Aluminio (kt)	189.6	482.3	1,182.8
Fibra de vidrio/carbono y resinas (kt)	632.0	1,607.5	3,942.5
Total (kt)	6,762.6	17,200.5	42,185.0

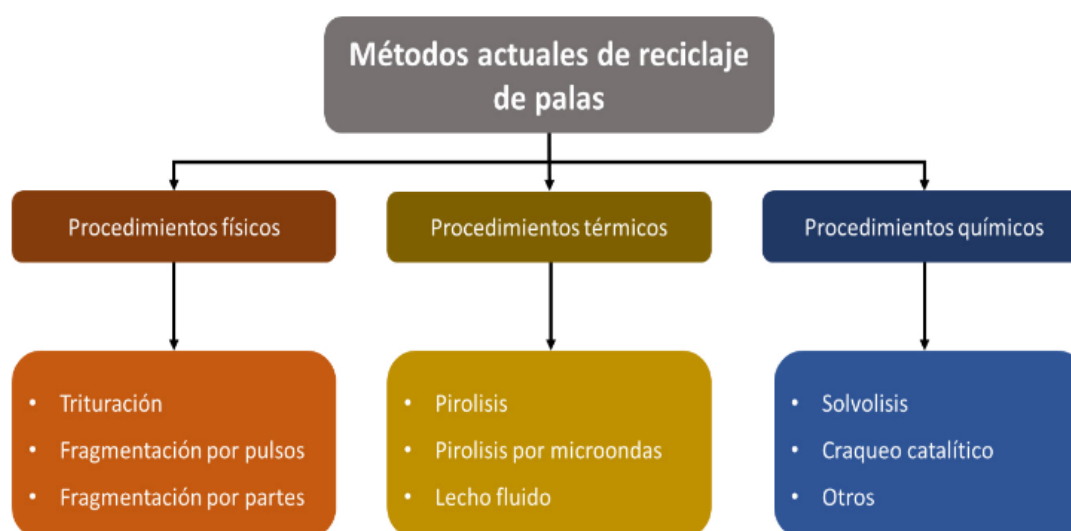
Fuente: elaboración propia

4.3. Procesos para disposición de los componentes de los aerogeneradores.

La mayor cantidad de materiales que compone un aerogenerador consiste en metales convencionales como el acero, el cobre y el aluminio, para los cuales los procesos de reciclaje se encuentran ampliamente desarrollados y consolidados industrialmente, por lo que el principal desafío está en reciclar el material de las aspas o palas del rotor compuesta de fibras de vidrio/carbono y resinas.

El problema de reciclar los materiales de las palas es que involucra procesos complejos y costosos y no logran recuperar completamente dichos materiales. Los métodos que actualmente se utilizan para esta recuperación parcial se ilustran en la Figura 2.

Figura 2. Métodos actuales de reciclaje de palas de los aerogeneradores.



Fuente: José Luis Colín Martínez et al, 2024, Revisión de métodos de reciclaje enfocado a las aspas de aerogeneradores en México.

5. Metodología para la estimación del valor económico recuperable de materiales provenientes de tecnologías de transición energética

La cuantificación de materiales contenidos en tecnologías de transición energética constituye un primer paso para evaluar las oportunidades asociadas a la economía circular. Sin embargo, la existencia física de materiales en paneles fotovoltaicos, baterías de ion-litio o aerogeneradores no implica que la totalidad de dichos recursos pueda recuperarse o reincorporarse a nuevas cadenas productivas.

Los procesos de recolección, desmontaje, clasificación, separación y reciclaje presentan limitaciones técnicas y económicas que afectan la cantidad efectiva de materiales recuperables. Adicionalmente, la pureza de los materiales obtenidos, los costos operativos y las condiciones de mercado influyen en el valor económico que puede generarse a partir de estos recursos secundarios.

Por esta razón, además de estimar el stock físico de materiales presentes en las tecnologías energéticas, es interesante evaluar el valor económico potencialmente recuperable, entendido como el valor asociado a la fracción de materiales que podría recuperarse mediante procesos de economía circular bajo condiciones técnicas y comerciales razonables.

5.1. Diferencia entre valor teórico y valor recuperable

El valor económico de los residuos tecnológicos se estima multiplicando la cantidad de material contenido por el precio internacional de las materias primas. Este enfoque permite aproximar el valor bruto de los recursos incorporados en los equipos, pero no refleja necesariamente el valor económico que podría recuperarse mediante actividades de reciclaje o valorización.

El valor teórico de un material puede expresarse como:

$$V_t = M * P$$

donde:

(V_t) = valor teórico del material (USD)

(M) = cantidad de material contenido (toneladas)

(P) = precio internacional del material (USD/t)

No obstante, en la práctica solo una fracción del material contenido puede recuperarse efectivamente debido a pérdidas inherentes a los procesos de tratamiento.

Por ello, el valor económico recuperable puede estimarse mediante:

$$V_r = M * R * P$$

donde:

(V_r) = valor económico recuperable (USD)

(M) = cantidad de material contenido (toneladas)

(R) = tasa de recuperación del material

(P) = precio internacional del material (USD/t)

En este marco, la tasa de recuperación debe interpretarse como un parámetro teórico que refleja la proporción del material que podría ser recuperada bajo condiciones tecnológicas ideales o en escenarios de desarrollo de capacidades de reciclaje, sin que ello implique valores empíricos específicos.

La aplicación conceptual de este marco permite comprender que el valor económico asociado a los materiales contenidos en tecnologías de transición energética no depende únicamente de su presencia física, sino también de la posibilidad técnica y económica de su recuperación.

Para facilitar la interpretación de los resultados, la valoración económica de los materiales puede entenderse en tres niveles:

Nivel Indicador Interpretación

Nivel 1. Valor bruto del contenido material: valor teórico obtenido a partir del contenido físico de materiales y los precios internacionales de referencia.

Nivel 2. Valor económico potencialmente recuperable: valor estimado considerando únicamente la fracción técnicamente recuperable de los materiales mediante procesos de economía circular.

Nivel 3. Valor económico neto recuperable: valor potencial descontando los costos asociados a la recolección, transporte, reciclaje y refinación. Este nivel no se desarrolla en la presente Nota Técnica debido a la ausencia de información homogénea para los países de ALC.

Esta clasificación permite diferenciar claramente el potencial físico de recursos contenidos en las tecnologías energéticas del valor económico que razonablemente podría obtenerse mediante estrategias de economía circular.

5.2. Valor agregado regional y economía circular

Además del valor económico asociado a la recuperación de materiales, la economía circular genera beneficios indirectos que no se reflejan en los precios internacionales de las materias primas. Entre ellos se encuentran:

- Reducción de la dependencia de materias primas vírgenes.
- Disminución de importaciones de materiales estratégicos.
- Generación de empleo asociado a actividades de recolección, clasificación y reciclaje.
- Desarrollo de cadenas de valor regionales.

- Reducción de impactos ambientales asociados a la extracción minera y procesamiento primario.
- Incremento de la seguridad de suministro de materiales críticos para la transición energética.

En este sentido, el valor económico potencial debe interpretarse dentro de un marco más amplio de beneficios asociados a la transición hacia modelos de producción y consumo más sostenibles.

5.3. Alcances y limitaciones

El presente marco metodológico tiene un carácter referencial y proporciona una herramienta analítica para dimensionar el potencial económico asociado a los materiales contenidos en las tecnologías de transición energética. La metodología distingue entre el valor bruto del contenido material y el valor económico potencialmente recuperable, permitiendo una interpretación más consistente de las oportunidades que ofrece la economía circular para el aprovechamiento de recursos estratégicos.

Asimismo, esta metodología no constituye una evaluación financiera de proyectos de reciclaje ni una estimación de rentabilidad económica. Su propósito es proporcionar un marco conceptual para cuantificar el potencial de valorización de materiales, el cual podrá complementarse en estudios futuros mediante la incorporación de costos de recuperación, análisis de cadenas de suministro, evaluación de mercados secundarios y escenarios tecnológicos específicos para los países de ALC.

5.4. Cuantificación del valor económico recuperable de los materiales de paneles fotovoltaicos en ALC al 2050.

Tabla 8. Valor económico recuperable del material presente en el parque generador fotovoltaico de ALC al 2050

	Cantidad al 2050 (kt)	Precio promedio (US\$/kt)	Tasa de recuperación (%)	Total (MUS\$)
<i>Aluminio</i>	3,947	3,410,000	95%	12,786
<i>Polímeros</i>	1,406	1,500,000	50%	1,054
<i>Cobre</i>	236	13,684,000	98%	3,170
<i>Vidrio</i>	14,910	1,000,000	95%	14,165
<i>Plata</i>	23	2,406,401,000	90%	50,679
<i>Silicio cristalino</i>	778	1,750,000	85%	1,157
Total	21,300			83,010

Fuente: elaboración propia

Como se observa en la tabla 8, la cantidad de materiales involucrados en los paneles fotovoltaicos que estarían instalados en ALC en el año 2050, llegaría a las 21.3 millones de toneladas métricas, que de acuerdo con los precios

promedio actuales de dichos materiales (LME, 2026), tendrían un valor de 83 mil millones de dólares, donde el 61% correspondería al precio de la plata.

5.5. Cuantificación del valor económico recuperable de los materiales de baterías de litio en ALC al 2050.

Tabla 9. Valor económico recuperable del material presente en las baterías de litio en ALC al 2050.

	Cantidad al 2050 (kt)	Precio promedio (US\$/kt)	Tasa de recuperación (%)	Total (MUS\$)
Óxidos metálicos	4,342	1,000,000	30%	1,303
Grafito	2,953	1,000,000	70%	2,067
Cobre	2,171	13,684,000	98%	29,116
Aluminio	5,211	3,410,000	95%	16,880
Sales de litio y solventes	2,171	17,000,000	50%	18,455
Polímeros	521	1,500,000	50%	391
Total	17,370			68,213

Fuente: elaboración propia

Considerando la cantidad de materiales constitutivos de las baterías de iones de litio utilizadas tanto para respaldo de los sistemas de generación eléctrica como para la electromovilidad que superarían los 17 millones de toneladas con valor económico recuperable estimado cercano a los 68 mil millones de dólares (LME, 2026), donde el valor del cobre sería el de mayor participación (43%).

5.6. Cuantificación del valor económico recuperable de los materiales de aerogeneradores en ALC al 2050.

Tabla 10. Valor económico recuperable del material presente en los aerogeneradores en ALC al 2050.

	Cantidad al 2050 (kt)	Precio promedio (US\$/kt)	Tasa de recuperación (%)	Total (MUS\$)
Acero	35,483	938,000	98%	32,617
Cobre	1,577	13,684,000	98%	21,148
Aluminio	1,183	3,410,000	95%	3,832
Fibra de vidrio/carbono y resinas	3,943	1,400,000	10%	552
Total	42,185			58,149

Fuente: elaboración propia

Con una disponibilidad de materiales de alrededor de 42 millones de toneladas presentes en los aerogeneradores instalados en la región de ALC en 2050, la región contaría en ese año con un valor económico recuperable cercano a los 58 mil millones de dólares, donde el acero y el cobre sería los de mayor participación

con 56% y 36% respectivamente. En contraste, el material de las aspas como fibra de vidrio/carbono y resinas sería el de menor valor económico recuperable.

6. Digitalización y análisis inteligente de datos para la economía circular en tecnologías energéticas

La transición energética no solamente implica el despliegue masivo de tecnologías renovables como sistemas fotovoltaicos, aerogeneradores y baterías de almacenamiento, sino también el desarrollo de estrategias que permitan gestionar de manera sostenible los materiales y residuos asociados a dichas tecnologías durante todo su ciclo de vida. En este contexto, la economía circular surge como un enfoque fundamental para maximizar el aprovechamiento de recursos, reducir la generación de residuos y minimizar los impactos ambientales asociados a la producción, operación y disposición final de los dispositivos energéticos.

Las herramientas digitales avanzadas, el análisis masivo de datos, los sistemas de monitoreo remoto y las tecnologías predictivas están adquiriendo un papel cada vez más relevante para fortalecer la circularidad de las tecnologías energéticas. Estas soluciones permiten optimizar la operación de los activos, extender su vida útil, reducir fallas prematuras y mejorar la planificación de los procesos de reutilización, reacondicionamiento y reciclaje.

Además de contribuir a la gestión del ciclo de vida de los activos, la inteligencia artificial permite optimizar la operación de los sistemas energéticos mediante el análisis de grandes volúmenes de datos en tiempo real. Aplicaciones como el pronóstico de generación renovable, la predicción de la demanda eléctrica, la gestión inteligente del almacenamiento de energía y la optimización del despacho contribuyen a incrementar la eficiencia operativa del sistema eléctrico, reducir pérdidas y maximizar el aprovechamiento de los recursos energéticos disponibles.

En los sistemas fotovoltaicos, el monitoreo continuo de variables operativas permite identificar pérdidas de rendimiento, detectar anomalías y estimar la degradación de los módulos. Esto facilita la programación eficiente del mantenimiento y contribuye a evitar el reemplazo prematuro de equipos que todavía pueden continuar operando de forma segura y eficiente.

De manera similar, los aerogeneradores modernos incorporan sistemas de supervisión capaces de analizar el comportamiento de componentes críticos como generadores, sistemas hidráulicos y palas. La detección temprana de desgaste o fallas potenciales permite programar intervenciones oportunas, reduciendo costos de operación y prolongando la vida útil de los equipos, lo que a su vez disminuye la generación temprana de residuos.

En este contexto la aplicación de inteligencia artificial adquiere una relevancia particular en los procesos de evaluación de baterías de ion-litio destinadas a una segunda vida útil. Una vez que las baterías utilizadas en electromovilidad

alcanzan niveles de degradación que limitan su desempeño para aplicaciones vehiculares, todavía conservan una fracción significativa de su capacidad de almacenamiento, la cual puede aprovecharse en aplicaciones estacionarias.

La principal dificultad consiste en determinar con precisión el estado de cada batería y estimar su capacidad remanente de operación segura. Tradicionalmente este proceso requiere pruebas especializadas que pueden resultar costosas y demandar largos tiempos de evaluación.

Los algoritmos de inteligencia artificial permiten analizar información histórica relacionada con ciclos de carga y descarga, temperatura de operación, profundidad de descarga, patrones de uso y parámetros eléctricos, con el fin de estimar de forma más precisa la vida útil remanente de cada batería.

Esta capacidad facilita la clasificación automática de baterías para diferentes destinos: reutilización directa, reacondicionamiento, segunda vida en sistemas estacionarios o reciclaje. Como resultado, se incrementa el aprovechamiento de los recursos materiales contenidos en estos dispositivos y se reduce la generación de residuos.

Adicionalmente, la inteligencia artificial puede utilizarse para implementar sistemas avanzados de mantenimiento predictivo en bancos de baterías estacionarias. Estos sistemas permiten identificar comportamientos anómalos, detectar riesgos potenciales de falla y optimizar las estrategias de operación, prolongando aún más la vida útil de los sistemas de almacenamiento energético.

Complementariamente, el uso de pasaportes digitales de baterías (*Battery Passport*) permitirá registrar durante todo el ciclo de vida información sobre la composición química, el origen de los materiales, el historial de operación, el estado y las intervenciones de mantenimiento de cada batería. Mediante el análisis de esta información, la inteligencia artificial puede optimizar la clasificación de las baterías para su reutilización, aplicaciones de segunda vida o reciclaje, fortaleciendo la trazabilidad de materiales críticos y la implementación de estrategias de economía circular. La combinación de reutilización, mantenimiento predictivo y reciclaje inteligente constituye una de las aplicaciones más prometedoras de la economía circular en el ámbito de la transición energética, especialmente considerando el crecimiento proyectado de la electromovilidad y del almacenamiento energético en ALC.

Estas tecnologías también están transformando los procesos de reciclaje y recuperación de materiales. Los sistemas automatizados de clasificación y separación permiten identificar con mayor precisión materiales como cobre, aluminio, vidrio, silicio y otros componentes presentes en paneles solares, baterías y equipos eléctricos. Como resultado, aumentan las tasas de recuperación de materiales valiosos y mejora la eficiencia de los procesos de valorización.

Asimismo, la trazabilidad digital de equipos y materiales a lo largo de su ciclo de vida facilita la identificación de componentes aptos para reutilización,

reacondicionamiento o reciclaje, fortaleciendo la implementación de esquemas de responsabilidad extendida del productor y programas de logística inversa.

Para ALC, estas herramientas representan una oportunidad para fortalecer las cadenas de economía circular asociadas a la transición energética, mejorar la recuperación de materiales estratégicos y desarrollar nuevas capacidades industriales vinculadas al reciclaje y la valorización de residuos tecnológicos. Su incorporación permitirá maximizar el aprovechamiento de recursos, reducir impactos ambientales y aumentar la sostenibilidad de los sistemas energéticos del futuro.

7. Experiencias destacables en países de ALC, respecto a la disposición de residuos de la transición energética.

En ALC, el reciclaje de residuos de la transición energética es todavía incipiente, aunque ya existen en algunos países leyes que regulan la disposición de este tipo de residuos enmarcadas principalmente en la legislación de protección ambiental. También algunas iniciativas empresariales ofrecen servicios de desmontaje de paneles fotovoltaicos y aerogeneradores en desuso para recuperar materiales valiosos, como metales y vidrio.

En cuanto a la disposición de baterías de litio, existen iniciativas, pero solamente para las de pequeña escala utilizadas en dispositivos portátiles. La correspondiente a baterías de gran escala, como las de autos eléctricos y de respaldo de sistemas de potencia eléctrica, se encuentran todavía en fase de investigación.

A continuación, se presenta una breve reseña del estado de las iniciativas de disposición de residuos de la transición energética en algunos países de ALC.

Argentina

La disposición de residuos fotovoltaicos en Argentina se basa en la gestión de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEEs), enfocándose en el desmantelamiento y reciclaje, ya que hasta el 90% de los paneles pueden recuperarse. Existen centros especializados, como Tecnorrae en Buenos Aires, que gestionan estos desechos, incluyendo la separación de materiales como vidrio y aluminio, cumpliendo con normas ambientales.

En cuanto a residuos de aerogeneradores, incluyendo torres metálicas y cimientos, se gestiona mediante reciclaje convencional, mientras que las palas de fibra de vidrio presentan desafíos, optándose por trituración para uso en materiales de construcción o valorización térmica en hornos cementeros para promover la economía circular.

Brasil

La disposición de residuos fotovoltaicos en Brasil se rige por la Política Nacional de Residuos Sólidos (PNRS), que exige la correcta eliminación para evitar la contaminación, aunque aún falta una legislación específica. Actualmente, empresas como SunR reciclan más del 80% de los módulos, recuperando materiales como aluminio y silicio, impulsando la logística inversa.

La disposición de residuos de aerogeneradores en Brasil, especialmente las palas de fibra de vidrio, está evolucionando hacia la economía circular, impulsada por la necesidad de reciclar componentes al final de su vida útil. Aunque hasta el 90% de un aerogenerador (acero, cobre) es reciclable, las palas representan un desafío mayor, buscando alternativas como su trituración para materiales de construcción y valorización energética.

Chile

Chile está desarrollando activamente infraestructura para el reciclaje de paneles fotovoltaicos, con miras a gestionar las más de 120,000 toneladas de desechos proyectadas para 2046.

Empresas como Hidronor (Antofagasta), Solar Recycling, Rodmik y Solek lideran la valorización de aluminio, cobre y vidrio, cumpliendo con la Ley de Responsabilidad Extendida del Productor (REP) y promoviendo la economía circular.

La disposición de residuos de aerogeneradores en Chile se enfoca en reciclar aproximadamente el 85% de la estructura (metales, componentes eléctricos). El mayor desafío radica en las palas de fibra de vidrio, que actualmente se reutilizan en infraestructura o se disponen en rellenos sanitarios, aunque la industria busca tecnologías de valorización.

Colombia

La disposición de residuos fotovoltaicos en Colombia se encuentra en una etapa inicial, caracterizada por una infraestructura de reciclaje limitada y la ausencia de una normativa específica detallada, enfrentando desafíos crecientes ante la vida útil de los primeros sistemas instalados. Actualmente, se gestionan bajo el marco general de los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE), prohibiendo su quema o disposición a cielo abierto.

La disposición de residuos de aerogeneradores en Colombia se enfoca en la economía circular, permitiendo reciclar hasta el 90% de la estructura, principalmente acero, cobre y aluminio de torres y cables. Sin embargo, las palas (fibra de vidrio/epoxi) presentan un reto técnico, optando por trituración para materiales de construcción o coprocesamiento energético en hornos cementeros.

Ecuador

En Ecuador la regulación sobre disposición de residuos de paneles solares está incluida en la normativa de responsabilidad extendida del productor de gestión de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, que aplica al fabricante, ensamblador e importador y cualquier persona natural o jurídica que coloque en el mercado dichos aparatos (MAATE, 2022). Actualmente Ecuador trabaja en una hoja de ruta para gestión de residuos de baterías de litio.

México

La disposición de residuos fotovoltaicos en México se encuentra en una fase inicial de desarrollo, sin una regulación federal específica, pero con un creciente enfoque en economía circular. Se estima un aumento exponencial de estos residuos, impulsando la necesidad de reciclar componentes como aluminio, vidrio y silicio, recuperando hasta el 96% de los materiales. Iniciativas pioneras como la asociación Rafiqui, ya operan programas de manejo.

La disposición de residuos de aerogeneradores en México se centra en el reciclaje del 90% de los materiales (acero, cobre) y el resto de las aspas, compuestas de fibra de vidrio y resina, que suelen terminar en vertederos o ser trituradas para materiales de construcción. Entre 2026 y 2037 se espera el desmantelamiento de más de 1,200 turbinas, impulsando a empresas como Grupo Sasti a buscar soluciones de reaprovechamiento.

Uruguay

La disposición de residuos fotovoltaicos en Uruguay se enmarca en la normativa nacional de gestión de residuos y economía circular, enfocándose en la valorización y el reciclaje (hasta un 90% de materiales) para reducir el impacto ambiental, bajo la responsabilidad del generador. Empresas privadas gestionan componentes como vidrio, aluminio y silicio, asegurando la correcta disposición.

La disposición de residuos de aerogeneradores en Uruguay, centrada en componentes como torres, nacelas y palas al final de su vida útil, prioriza el reciclaje del acero y cobre (hasta 90% del total). El mayor desafío técnico radica en las palas de fibra de vidrio, para las cuales se exploran técnicas de molienda para materiales de construcción y valorización energética, en línea con un enfoque de economía circular.

El Gobierno de Uruguay, mediante Decreto N°227/025 publicado el 5 de noviembre de 2025, expidió una normativa para la gestión de los residuos de baterías, incluidas las utilizadas en los autos eléctricos, que en su Artículo 3 establece lo siguiente:

- a. Se priorizará la minimización de generación de residuos de baterías, frente a cualquier otra alternativa, buscando maximizar su vida útil, mediante la aplicación de buenas prácticas de manejo, mejores tecnologías disponibles para recarga y mejora de la calidad y durabilidad de sus componentes. El Ministerio de Ambiente, en coordinación con el Ministerio de Industria, Energía y Minería, podrá establecer requerimientos específicos a cumplir para lograr la minimización de la generación de residuos provenientes de baterías.
- b. En forma subsidiaria, se promoverán los procesos de segundo uso, reciclado y otras formas de valorización de los residuos de baterías, priorizándolos en este orden.
- c. Las alternativas de tratamiento y disposición final se considerarán como opciones de última instancia, debiendo minimizarse los efectos ambientales que de ellas puedan derivarse.
- d. Las distintas etapas de la gestión de residuos deberán ejecutarse mediante actividades formales, que cuenten con las autorizaciones correspondientes y aseguren el cumplimiento de las condiciones ambientales y sanitarias adecuadas.
- e. Se priorizará la valorización nacional, siempre que existan capacidades instaladas autorizadas por el Ministerio de Ambiente para el tipo de batería que se quiera gestionar y siempre que ello no genere condiciones desiguales de competencia o perjuicios graves en la economía nacional.

8. Conclusiones

Las proyecciones realizadas en la presente Nota Técnica, sobre las cantidades de materiales que estarían contenidas en los dispositivos tecnológicos, involucrados en la transición energética de ALC, como paneles fotovoltaicos, baterías de iones de litio y aerogeneradores, durante los próximos 25 años son muy considerables. Serían cerca de 81 millones de toneladas en el año 2050, de las cuales 36 millones de toneladas serían acero, representando un 63% de la producción anual actual de acero en ALC; 4 millones de toneladas serían de cobre equivalente al 40% de la producción anual actual de cobre de esta región y 10 millones de toneladas serían de aluminio, casi el triple de la producción anual actual de este metal en ALC, por lo que su reciclaje significará un importante ahorro tanto en el costo de producción de estos metales como en reducción del impacto ambiental en las actividades de explotación minera y procesamiento industrial. Los 31 millones de toneladas de materiales restantes, corresponden a otros componentes como vidrio, silicio, plata, grafito, polímeros, fibra de vidrio, resinas y óxidos metálicos.

Con los precios promedio actuales de los diferentes materiales constitutivos de las tecnologías analizadas y de acuerdo con sus correspondientes tasas de recuperación para reciclaje, se estima que para el año 2035 el valor económico recuperable de estos materiales ascendería a US\$ 84 mil millones y el 2050 un total de US\$ 209 mil millones.

Si bien la vida útil de los paneles fotovoltaicos y los aerogeneradores es de alrededor de 30 años, muchos de estos dispositivos se desechan antes de terminar su vida útil, debido a actualización tecnológica y averías prematuras, por lo cual, las oportunidades de reciclaje pueden darse de manera continua.

En cuanto a la disposición de baterías de litio de gran escala en la región, aunque no exista todavía una demanda importante, debido a que la electromovilidad es un tema relativamente reciente y los bancos de baterías de respaldo de los sistemas de generación eléctrica está en etapa muy inicial, por el potencial contaminante de algunos de sus componentes, se debe empezar a diseñar estrategias para su disposición.

La gestión de residuos de tecnologías de la transición energética no debe entenderse únicamente como un desafío ambiental, sino también como una oportunidad para impulsar cadenas regionales de economía circular, recuperación de minerales críticos y nuevas capacidades industriales asociadas al reciclaje y valorización de materiales estratégicos.

En este contexto, resulta importante que los países de ALC fortalezcan marcos regulatorios específicos, esquemas de responsabilidad extendida del productor, sistemas de trazabilidad y programas de logística inversa, así como capacidades regionales de reciclaje y valorización de materiales provenientes de tecnologías energéticas.

La inteligencia artificial puede convertirse en un habilitador clave de la economía circular en las tecnologías energéticas, al permitir extender la vida útil de paneles fotovoltaicos, aerogeneradores y sistemas de almacenamiento mediante estrategias de monitoreo inteligente y mantenimiento predictivo, así como la aplicación de herramientas digitales en procesos de reutilización, segunda vida y reciclaje de baterías de ion-litio contribuye a maximizar la recuperación de materiales críticos, reducir la generación de residuos y fortalecer cadenas de valor asociadas a la transición energética.

El desarrollo de capacidades regionales en digitalización, análisis de datos e inteligencia artificial permitirá a los países de ALC mejorar la gestión de los residuos tecnológicos, incrementar la eficiencia de los procesos de valorización y consolidar modelos de economía circular orientados a la sostenibilidad de largo plazo.

9. Referencias bibliográficas

- BBVA. 2023. El reciclaje de los aerogeneradores: asignatura pendiente.
<https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/el-reciclaje-de-los-aerogeneradores-asignatura-pendiente/>
- Bolsa de Metales de Londres – LME. 2026. Precios diarios de los metales.
<https://www.lme.com/>
- Centro de Información Oficial – INFO, Uruguay. 2025. Decreto N° 227/025
<https://www.impo.com.uy/bases/decretos/227-2025>
- CIDETEC Energy Storage en colaboración con Fundación de Cambio Climático de Gipuzkoa – NATURKLIMA. 2025.
<https://naturklima.eus/documentos/documentos/ZIRKULAR-BAT-250502-Informe-monografico-reciclaje-baterias-Europa-vF.pdf#:~:text=El%20reciclaje%20de%20bater%C3%ADas%20de%20iones%20de,el%20proceso%20en%20dos%20grandes%20fases:%201.>
- European Comission. 2026. Analysis of Material Recovery from Silicon Photovoltaic Panels.
<https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC100783>
- Gestores de residuos. 2024. PV Cycle y SunR impulsan el reciclaje de paneles fotovoltaicos en Latinoamérica.
<https://gestoresderesiduos.org/noticias/pv-cycle-y-sunr-impulsan-el-reciclaje-de-paneles-fotovoltaicos-en-latinoamerica>
- GridX. 2025. Battery Degradation
<https://www.gridx.ai/knowledge/what-is-battery-degradation-and-how-to-prevent-it>
- Grupo ENEL. 2026. ¿Qué es una batería de segunda vida?
<https://corporate.enelx.com/es/question-and-answers/what-is-second-life-battery>
- Instituto Nacional de Propiedad Intelectual – INAPI. 2024. Informe de Vigilancia Tecnológica.
https://www.inapi.cl/docs/default-source/2024/centro-de-documentacion/informes/informe-vigilancia-tecnologica/informe_vt31.pdf?sfvrsn=d1fd2029_1

- International Energy Agency – IEA. 2025. Energy and AI
<https://iea.blob.core.windows.net/assets/de9dea13-b07d-42c5-a398-d1b3ae17d866/EnergyandAI.pdf>
- José Luis Colín Martínez et al. 2024. Revisión de métodos de reciclaje enfocado a las aspas de aerogeneradores en México
<https://revistaingenieria.org/index.php/revistaingenieria/article/view/159>
- LARCE. 2025. Tabla resumen de baterías a base de litio. <https://www.large-battery.com/es/blog/summary-table-lithium-based-batteries/>
- María Claudia Botán et al. 2025. Desafíos del reciclaje y la reutilización al final del ciclo de vida de los paneles fotovoltaicos. <https://www.intechopen.com.translate.goog/journals/7/articles/580? x tr sl=en& x tr tl=es& x tr hl=es& x tr pto=tc& x tr hist=true>
- Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica - MAATE, Ecuador. 2022. Acuerdo Ministerial No. MAATE-2022-067
<https://sustanciasyresiduos.ambiente.gob.ec/producto/acuerdo-ministerial-maate-2022-067/>
- Revista Canal Solar, Brasil. 2025. La transición energética exige una nueva perspectiva sobre el final de la vida útil de los módulos solares.
<https://canalsolar.com.br/es/Reciclaje-al-final-de-la-vida-%C3%BAtil-de-los-m%C3%B3dulos-solares/>
- The Wind Power. 2026. Fabricantes de aerogeneradores.
https://www.thewindpower.net/turbine_es_33_vestas_v90-3000.php

United States Environmental Protection Agency. 2025. Reciclaje de baterías de iones de litio. <https://www.epa.gov.translate.goog/hw/lithium-ion-battery-recycling? x tr sl=en& x tr tl=es& x tr hl=es& x tr pto=tc>

CDE Comunicación. (2024). El reciclaje de paneles fotovoltaicos alcanzará un valor de 2.700 millones de dólares en 2030. <https://material-electrico.cdecomunicacion.es/noticias/sectoriales/53564/reciclaje-de-paneles-fotovoltaicos-valor-de-2-700-millo...>

Parlamento Europeo. (2023, May 23). Economía circular: definición, importancia y beneficios.
<https://www.europarl.europa.eu/topics/es/article/20151201STO05603/economia-circular-definicion-importancia-y-beneficios>

Tribunal de Cuentas Europeo. (2025). Materias primas fundamentales para la transición energética: La política no es contundente.

https://www.eca.europa.eu/ECAPublications/SR-2026-04/SR-2026-04_ES.pdf

Union of Concerned Scientists. 2025. Tasas de recuperación de minerales: el porqué y el cómo para la política de reciclaje de baterías de iones de litio. [https://blog-ucs-org.translate.goog/jessica-dunn/mineral-recovery-rates-the-why-and-how-for-lithium-ion-battery-recycling-policy/? x tr sl=en& x tr tl=es& x tr hl=es& x tr pto=sge](https://blog-ucs-org.translate.goog/jessica-dunn/mineral-recovery-rates-the-why-and-how-for-lithium-ion-battery-recycling-policy/?x_tr_sl=en&x_tr_tl=es&x_tr_hl=es&x_tr_pto=sge)

World Economic Forum. (2024, August 12). La transición energética está creando una transición histórica de los materiales: Veamos por qué. <https://es.weforum.org/stories/2024/08/la-transicion-energetica-esta-creando-una-transicion-historica-de-los-materiales-veamos-p>



Olacde



@OLACDEORG



@olacde_org



Conexiones Energéticas - OLACDE



Organización Latinoamericana y Caribeña de Energía



Organización Latinoamericana y Caribeña de Energía

www.olacde.org