



Reciclaje de eólica, fotovoltaica y baterías en Europa:

una oportunidad para la recuperación
de materias primas críticas

Autores

Teresa Grijelmo
Lluís Molina
Javier Sanz



Este libro se ha impreso utilizando papel libre de cloro de 300 gr. para la cubierta y de 150 gr. para el interior con certificación forestal PEFC de la Asociación Española para la Sostenibilidad Forestal.

Resumen ejecutivo	4
Acrónimos	10
Listado de gráficos	12
Listado de tablas	13
Contexto e introducción al estudio	14
Energía solar fotovoltaica	20
Energía eólica	42
Baterías	60
Debate	82
Conclusiones	94
Referencias	98

Resumen ejecutivo

Se prevé una expansión del 50% del sector europeo de las energías renovables en los próximos cinco años gracias a unas tecnologías de descarbonización cada vez más fiables, que a su vez aportarán riqueza y crearán empleo.

La tracción del mercado y las previsiones del sector son ambiciosas en el caso de las energías eólica y solar fotovoltaica, mientras que las baterías son clave para la electrificación de la movilidad y el aumento de las renovables en el mix energético. Sin embargo, el impulso a la implantación de las tecnologías de energías renovables plantea un problema no resuelto: cómo gestionar la ingente cantidad de residuos que se generan cuando alcanzan el final de su vida útil. La gestión de estos residuos es motivo de inquietud; nadie quiere ver las palas de los aerogeneradores, los paneles de las plantas fotovoltaicas o las baterías en los vertederos, sobre todo cuando se comercializan como ecológicos.

Es evidente que la cuestión es de gran importancia, como refleja este informe. La gestión eficaz del final de la vida útil en el sector de las energías renovables es esencial para lograr la transición energética y la independencia energética de Europa. Según el Pacto Verde Europeo, garantizar el acceso a los recursos es

Hasta la fecha, el 60% de la demanda mundial de materiales se extrae en China, mientras que Europa sigue dependiendo de las importaciones extranjeras para más del 80% de las materias primas.

estratégicamente necesario para alcanzar los ambiciosos objetivos de 2050. Hasta la fecha, el 60% de la demanda mundial de materiales se extrae en China, mientras que Europa sigue dependiendo de las importaciones extranjeras para más del 80% de las materias primas. Esto demuestra la enorme dependencia de la economía europea de las importaciones de numerosos minerales y metales, que



Si bien la plata supone únicamente el 0,5% de la masa de un módulo fotovoltaico, representa el 47% del valor económico total del módulo.

son vulnerables o corren el riesgo de sufrir escasez de suministro. Según la Iniciativa Europea de Materias Primas, para determinar qué materiales son críticos es necesario evaluar su disponibilidad geográfica, su valor económico, la calidad de los recursos naturales y los desequilibrios entre la oferta y la demanda. No existe un consenso general entre los diversos modelos científicos que intentan predecir el impacto de la escasez de materiales en Europa. A pesar de ello, los expertos sí están de acuerdo en la necesidad de un sistema mejorado que fomente el desarrollo de una economía circular con un reciclaje y una reutilización más eficaces de las materias primas críticas, aplicando modelos de producto y soluciones como el diseño ecológico. Asimismo, los avances tecnológicos deberían permitir un aumento de las tasas de recuperación de los componentes críticos, mientras Europa afronta la necesidad de diversificar las importaciones y formula una estrategia de expansión de la minería nacional. Para evaluar correctamente la capacidad de adaptación de la UE a la creciente demanda de materias primas, es necesario realizar estudios adicionales que examinen la evolución de los futuros suministros de materiales y los comparen con los resultados de la demanda de materiales presentados en este informe.

En la actualidad, el 20% de la plata mundial es utilizada por la industria fotovoltaica con un nivel de implantación de más de 160 GW al año. Esta situación será más acuciante en los próximos años, ya que la capacidad

de generación mundial aumentará hasta los 500 GW anuales. Como se expone en el ambicioso plan REPowerEU, el objetivo es implantar 40 GW al año sólo en Europa. Si bien la plata supone únicamente el 0,5% de la masa de un módulo fotovoltaico, representa el 47% del valor económico total del módulo. Los paneles fotovoltaicos se fabrican con materiales valiosos, tóxicos y con un alto coste de fabricación. Diversas previsiones concluyen que se ejercerá una cierta presión sobre otros materiales en este mercado, especialmente el germanio, el telurio, el indio, el selenio y el silicio. Aunque la tasa de recuperación de los paneles fotovoltaicos parece elevada (en torno al 80% del peso), las técnicas de reciclaje más utilizadas no permiten recuperar estos materiales críticos, ya que una gran mayoría consiste en tratamientos mecánicos que limitan la recuperación a los componentes más pesados y de escaso valor económico. Sin embargo, en el futuro, las empresas que gestionen el tratamiento de estos residuos deberán tratar no sólo el material a granel, sino, sobre todo, los materiales que integran los sistemas. Su recuperación es clave para crear un incentivo en el mercado del reciclaje fotovoltaico, tanto desde el punto de vista de la sostenibilidad como de la economía. Es muy probable que esto implique procesos adicionales que vayan más allá de los tratamientos mecánicos, promoviendo la aplicación de requisitos mínimos de tratamiento y especificaciones técnicas relacionadas para la descontaminación.

La industria eólica es bastante eficaz en la reutilización de componentes y en la reincorporación de estos materiales a la industria, especialmente en el rango de 750kW-2,5MW de potencia nominal.

Como evaluación del reto del sector de la energía eólica: Europa pretende implantar cerca de 30 GW de nueva capacidad al año, lo que supone más de 1,5 millones de toneladas métricas de materiales, que pueden compensarse en parte con los recuperados de los parques eólicos desmantelados. En el caso de los aerogeneradores estándar, los materiales no específicos representan más del 90% del peso total, por lo que ya existen tecnologías y modelos de negocio para la recuperación de materiales. En cuanto al resto, el envío a vertedero sigue siendo la solución más habitual. Entre el 10% restante podemos encontrar algunas tierras raras y materiales compuestos, que tienen una importancia estratégica y un alto valor intrínseco, por lo que ofrecen un campo para la investigación. Los materiales

En 2035 será necesario recuperar el 30% del cobalto y el 20% del litio y el níquel de las baterías usadas para poder hacer frente a la demanda prevista.

compuestos son intrínsecamente inertes y no tóxicos, por lo que se clasifican como no peligrosos. Sin embargo, se están estudiando diferentes procesos debido a su gran impacto visual y al largo periodo de degradación. Los principales retos que plantea el reciclaje de tierras raras son su dificultad para descomponerse, sus bajas concentraciones y la necesidad de procesos costosos en comparación con el valor recuperado. Asimismo, la mayoría de estos materiales tienen menos valor que el propio componente de la turbina, por lo que tiene más sentido repararlo o renovarlo.

En consecuencia, la industria eólica es bastante eficaz en la reutilización de componentes y en la reincorporación de estos materiales a la industria, especialmente en el rango de 750kW-2,5MW de potencia nominal. Idealmente, el uso circular de materiales reciclados podría suministrar un tercio de los materiales necesarios en Europa. Sin embargo, la industria seguirá necesitando la mayor parte de las tierras raras disponibles, lo que ejercerá una considerable presión sobre los suministros.

En cuanto a las soluciones de almacenamiento, este informe se centra en la evaluación de las baterías de iones de litio y su uso en el sector del automóvil, que representa al menos el 80% de su uso. En 2021, las ventas mundiales de coches eléctricos superaron los 6 millones de unidades, y aunque China sigue siendo el principal protagonista de este mercado, Europa está a la cabeza en términos de cuota de mercado. Por esta razón, el reciclaje juega un papel aún más crítico, ya que la minería no podrá proporcionar toda la materia prima necesaria para esta industria. A día de hoy, el número de baterías que llegan al mercado sigue siendo insignificante, pero a partir de 2026-27 la cantidad de residuos alcanzará proporciones significativas. En lo que respecta a las materias primas críticas a nivel mundial, en 2035 será necesario recuperar el 30% del cobalto y el 20% del litio y el níquel de las baterías usadas para poder hacer frente a la demanda prevista. Si no se alcanzan estos objetivos, estará en riesgo la transición verde.

El reciclaje de baterías es hoy una realidad compleja porque no existen prácticas estandarizadas entre los fabricantes. Esto se simplificará en el futuro con el aumento de la actividad, lo que dará lugar a economías de escala y a una mayor participación de los fabricantes de automóviles y de celdas de baterías. Esto aportará una mayor eficiencia y homogeneización a los flujos de baterías al final de su vida útil, además de fomentar su diseño ecológico. Otro reto es el de la obtención de permisos, un proceso lento y dificultoso a día de hoy.



El reciclaje desempeña un papel clave en el cumplimiento de la transición verde

En algunos casos, ya existe una normativa en vigor, en otros aún está por llegar. En la práctica, sigue existiendo una enorme brecha entre los productores y los operadores de reciclaje que es necesario superar. En los últimos años, los esfuerzos reguladores han logrado que el reciclaje sea obligatorio en Europa. Un buen ejemplo de ello es el reciente anuncio de una nueva normativa comunitaria sobre baterías. La Comisión Europea también pretende ampliar la directiva de diseño ecológico para promover la circularidad en los procesos industriales, utilizar tecnologías digitales para el seguimiento de los recursos y conseguir una marca de certificación medioambiental de la UE. Aun así, la UE requerirá un liderazgo político, una orientación y un apoyo normativo adecuados, así como estrategias de comunicación pública. Hasta la fecha no existen datos oficiales sobre la cantidad de residuos producidos o reciclados, y la disponibilidad de materiales no es fácil de prever, ya que las demandas de materiales para las energías fotovoltaica y eólica y las baterías fluctúan mucho, dada la dependencia de cada tecnología de su cuota de mercado relativa. Al mismo tiempo, la innovación y los avances tecnológicos han llevado a la industria energética a reducir notablemente su uso de materiales.

Este informe también tiene en cuenta la perspectiva empresarial a la hora de establecer un esquema de reciclaje fiable, desde las alternativas de recogida hasta las oportunidades de segundo uso y la recuperación de materiales. En el caso de la energía fotovoltaica, el objetivo específico es recuperar materiales de

alto valor y reincorporarlos al sector; en el caso de la energía eólica, se trata del reacondicionamiento de componentes que pueden prolongar la vida útil de otros activos; y en el caso de las baterías, el objetivo es mitigar la escasez de materiales más allá de cualquier consideración financiera adicional. Se evalúa un modelo de negocio genérico que pretende minimizar los residuos, por lo que algunos productos derivados se recuperan de forma que puedan volver a su uso original, mientras que otros se destinan a otros usos. El primer reto planteado es la necesidad de financiación de una empresa de reciclaje desde una fase temprana, ya que el proceso de reciclaje suele ser más costoso que la compra directa del producto nuevo o los derivados recuperados son técnicamente deficientes. Una de las soluciones es la creación de organismos legales conocidos como sistemas colectivos de responsabilidad ampliada del productor (SCRAP) que financian el negocio con una ecotasa abonada por los clientes finales al adquirir el nuevo producto. En los casos en los que el reciclaje es rentable, se deja al mercado la gestión de la estructura empresarial; los productos derivados son escasos como materiales nuevos, y esto ofrece la oportunidad de recuperarlos para reintroducirlos en el mercado. Esto anima a los productores a participar activamente en el flujo de sus productos al final de su vida útil.

En definitiva, el objetivo de este informe es mostrar cómo el reciclaje desempeña un papel clave en el cumplimiento de la transición verde, marcando una senda sostenible para la gestión de los residuos y compensando los riesgos de escasez de materias primas. La situación exige un marco adecuado para mitigar este riesgo. Las industrias y los socios de I+D en Europa están centrados en hacer frente a los principales retos y establecer los modelos de negocio adecuados para abordar la reciclabilidad y la huella de carbono de estas tecnologías. Esto no sólo reducirá la enorme huella de CO₂ derivada de sus residuos, también permitirá a Europa recuperar materiales críticos y desarrollar cadenas de suministro locales.

Acrónimos

- 3R:** Reducir, reutilizar, reciclar
- ACV:** Análisis de ciclo de vida
- AEDIVE:** Asociación Empresarial para el desarrollo e impulso del Vehículo Eléctrico
- AEE:** Aparatos eléctricos y electrónicos
- AIE:** Agencia Internacional de la Energía
- BEV:** Siglas en inglés de Vehículo Eléctrico de Batería
- BMS:** Siglas en inglés de sistema de gestión de baterías
- BNEF:** Bloomberg New Energy Finance
- CETE:** Comisión de Expertos de Transición Energética
- CFC:** Siglas en inglés de Hormigón celular
- CIEMAT:** Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas
- DUH:** Deutsche Unwelthilfe
- EAD:** Escenario de alta demanda
- EBD:** Escenario de baja demanda
- EDM:** Escenario de demanda media
- EIA:** Evolución de Impacto Ambiental
- ENTSO-E:** Red Europea de Gestores de Redes de Transporte de Electricidad
- FCV:** Siglas en inglés de Vehículo Eléctrico de Pila de Combustible
- FV:** Fotovoltaica
- GFC:** Siglas en inglés de Hormigón reforzado con fibra de vidrio
- GI-ADGB:** Generador de Inducción de Alimentación Directa Gearbox
- GS-EEAD:** Generador Síncrono de Excitación Externa de Accionamiento Directo
- GS-IPAD:** Generador Síncrono de Imán Permanente de Accionamiento Directo
- GS-IPGB:** Generador Síncrono de Imán Permanente Gearbox
- GW:** gigavatio
- HEV:** Siglas en inglés de Vehículo Híbrido Eléctrico
- HREE:** Siglas en inglés de Tierras Raras Pesadas
- I+D:** Investigación y Desarrollo
- ICV:** Inventario de Ciclo de Vida
- IEA PVPS:** Programa de Sistemas de Energía Fotovoltaica de la Agencia Internacional de la Energía
- IRENA:** Agencia Internacional de Energías Renovables
- kT:** kilotón
- kW:** kilovatio
- LCO:** Óxido de litio y cobalto
- LFP:** megawatt
- Li-Ion:** Iones de litio

LMO: Óxido de litio y manganeso

LREE: Siglas en inglés de Tierras Raras Ligeras

MW: megavatio

Na-ion: Ion sodio

NMC: Níquel, manganeso y cobalto

PAEC: Plan de Acción de Economía Circular

PGM: Siglas en inglés de Metales del grupo del platino

PHEV: Siglas en inglés de Vehículo Híbrido Eléctrico Enchufable

PNIEC: Plan Nacional Integrado de Energía y Clima

PPA: Acuerdos de Compra de Energía

RAEE: Directiva de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos

SCRAP: Sistemas Colectivos de Responsabilidad Ampliada del Productor

TIC: Tecnologías de la Información y la Comunicación

UE: Unión Europea

UNEF: Unión Española Fotovoltaica

TIC: Tecnologías de la Información y la Comunicación

VE: Vehículos Eléctricos

Listado de gráficos

- Gráfico 1.** Comparativa de los minerales utilizados en diferentes tecnologías energéticas (kg/MW) **15**
- Gráfico 2.** Escenarios del mercado fotovoltaico anual para 2022-2025 en los 27 Estados miembros (Fuente: SolarPower Europe 2021) **24**
- Gráfico 3.** Los 10 principales productores de energía fotovoltaica en la UE en 2022-2025 (Fuente: SolarPower Europe 2021) **26**
- Gráfico 4.** Evolución de la capacidad fotovoltaica instalada anual y acumulada para los dos escenarios elegidos por el comité de expertos. La potencia fotovoltaica anual instalada a partir de 2018 se aproxima inicialmente al incremento anual de la capacidad fotovoltaica acumulada, sin considerar las necesidades de repotenciación **28**
- Gráfico 5.** Relación entre la demanda y la oferta mundial de materiales para el sector FV en 2030 y 2050: niveles de demanda cercanos a la disponibilidad actual **29**
- Gráfico 6.** Residuos anuales de módulos fotovoltaicos previstos en Europa **30**
- Gráfico 7.** Paneles fotovoltaicos instalados anualmente y al final de su vida útil (2020-2050) Escenarios de pérdida temprana y pérdida regular **31**
- Gráfico 8.** Cantidades acumuladas de residuos fotovoltaicos recogidos por país **32**
- Gráfico 9.** Proceso de separación para el reciclaje de módulos fotovoltaicos **33**
- Gráfico 10.** Diagrama de flujo de la vida útil de los aerogeneradores y sus componentes **44**
- Gráfico 11.** Aumento de la capacidad anual **48**
- Gráfico 12.** Retirada de capacidad anual **49**
- Gráfico 13.** Perspectivas para el mercado europeo 2012-2050 **50**
- Gráfico 14.** Evolución en el número de unidades instaladas por VESTAS y su potencia nominal **52**
- Gráfico 15.** Funcionamiento de una batería Li-Ion. Fuente: Md Ashiqur Rahaman Khan **62**
- Gráfico 16.** Ventas mundiales de vehículos eléctricos. Fuente: EV volumes (www.ev-volumes.com) **64**
- Gráfico 17.** Cuota de mercado de los nuevos turismos eléctricos enchufables por región/país (2015-2021) Fuente: European Battery Alliance **65**
- Gráfico 18.** Curva de penetración de las ventas mundiales de VE **66**
- Gráfico 19.** Tasas de penetración de VE en los principales mercados (Fuente: UBS) **66**
- Gráfico 20.** Consumo adicional de material previsto solo para las baterías de movilidad eléctrica en 2030/2050 en comparación con el consumo actual en la UE del material en todas las aplicaciones (Fuente: Benchmark Minerals) **67**
- Gráfico 21.** Déficit potencial creciente a partir de 2021/22 (Fuente: Benchmark Mineral Intelligence) **69**
- Gráfico 22.** Retirada anual de baterías por regiones (Fuente: Bloomberg) **70**
- Gráfico 23.** Tasas necesarias de recuperación de metales para satisfacer la demanda del mercado mundial (Fuente: Bloomberg) **71**
- Gráfico 24.** Retirada de baterías en España **73**
- Gráfico 25.** Reciclaje de baterías. Proceso pirometalúrgico (Fuente: Universidad de Aquisgrán) **74**
- Gráfico 26.** Proceso hidrometalúrgico para el reciclaje de baterías (Fuente: Universidad de Aquisgrán) **76**
- Gráfico 27.** Etapas básicas de un modelo de negocio de reciclaje de productos **83**
- Gráfico 28.** Funcionamiento de un Sistema Colectivo de Responsabilidad Ampliada del Productor (SCRAP) **84**
- Gráfico 29.** Gráfico 29. Generación potencial de valor de una industria de gestión de residuos fotovoltaicos **86**
- Gráfico 30.** Acuerdos de colaboración europeos relacionados con el reciclaje de baterías **92**

Listado de tablas

- Tabla 1.** Principales países suministradores de materias primas críticas – materiales individuales 17
- Tabla 2.** Composición de un panel fotovoltaico de silicio. Pesos y valores relativos de cada material (Fuente: IRENA) 23
- Tabla 3.** Toneladas métricas de material por GW (ref: *Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system, JRC – European Commission, Carrara, S., Alves Dias, P., Plazzotta, B., Pavel, C., 2020*) 45
- Tabla 4.** Necesidades de materiales frente a la capacidad de producción y los precios (todo ello referido a toneladas métricas) para una retirada anual de 10 GW 46
- Tabla 5.** Aerogeneradores operativos instalados en Europa (2021) 51
- Tabla 6.** Composición de los materiales de los principales componentes 53
- Tabla 7.** Principales normas de aplicación nacional al desmantelamiento de aerogeneradores en Europa 57
- Tabla 8.** Descripción e índices de recuperación 77
- Tabla 9.** Rentabilidad del reciclaje (Fuente: Faraday Institution) 77
- Tabla 10.** Rentabilidad del reciclaje de baterías en base a los compuestos químicos del cátodo. (Fuente: Circular Energy Storage) 78
- Tabla 11.** Requisitos de la normativa sobre baterías para su reciclaje 80

Contexto e introducción al estudio

Según la Agencia Internacional de la Energía (AIE), la capacidad de generación de energía a partir de fuentes renovables aumentará un 50% en los próximos cinco años debido a la instalación de paneles solares fotovoltaicos, que absorberán el 60% del crecimiento frente al 25% derivado de los sistemas eólicos.

La senda hacia los objetivos *Fit for 55* (2030) y *Net Zero* (2050) deberá basarse en estas tecnologías maduras, capaces de suministrar grandes cantidades de energía a un precio competitivo y con una fiabilidad probada. La industria europea es líder mundial en ambas, por lo que los beneficios son superiores a los relacionados con la descarbonización, añadiendo un importante factor de creación de riqueza y empleo. Este incremento de la implantación, de innegables beneficios, deja sin embargo una huella que comienza a ser preocupante: la fabricación, el transporte y el mínimo reciclaje de las materias primas necesarias para el desarrollo de las tecnologías de energías renovables dejan un rastro contaminante a su paso.

Por otra parte, la rápida transición a las fuentes de energía renovable supone una dependencia aún mayor de las materias primas para Europa. Como podemos ver en el siguiente gráfico, las tecnologías limpias requieren diversos minerales. En este estudio mostraremos cómo el desarrollo de cadenas de valor sólidas que sustenten una economía circular estable, basada en la eficiencia de los recursos, el reciclaje, la reutilización, la reparación, la sustitución y el uso de fuentes secundarias, desempeñará un papel cada vez más importante en un futuro próximo.



Gráfico 1.
Comparativa de los minerales utilizados en diferentes tecnologías energéticas (kg/MW).
 Fuente IEA.



Excluidas las necesidades de minerales de explotación para la energía nuclear, el carbón y el gas natural.

Los objetivos de neutralidad climática dependen del suministro de materias primas esenciales, entre las que se encuentran estos minerales. De hecho, el comunicado de la UE sobre el Pacto Verde Europeo, publicado en 2019, ya reconocía el acceso a los recursos como una cuestión de seguridad estratégica básica para alcanzar los objetivos de 2050 y aumentar los objetivos climáticos para 2030. Las materias primas no solo son esenciales para la producción de una amplia gama de bienes y servicios utilizados en la vida cotidiana, sino también para el desarrollo de innovaciones emergentes que contribuyen de forma significativa a la creación de tecnologías más ecoeficientes y productos competitivos a nivel mundial. Para la UE, la importancia de las materias primas no afecta únicamente a las tecnologías limpias que dependen de ciertas materias primas consideradas insustituibles en los paneles solares, los aerogeneradores, los vehículos eléctricos y la iluminación de bajo consumo, sino también a las cadenas de valor industrial de los materiales no energéticos y a

otras estrategias generales de progreso tecnológico y económico. Muchos de estos materiales se extraen actualmente en un número reducido de países, lo que aumenta el riesgo de escasez y vulnerabilidad del suministro a lo largo de la cadena de valor.

Las materias primas no solo son esenciales para la producción de una amplia gama de bienes y servicios utilizados en la vida cotidiana, sino también para el desarrollo de innovaciones emergentes que contribuyen de forma significativa a la creación de tecnologías más ecoeficientes y productos competitivos a nivel mundial

Un ejemplo es el litio, un material clave para sectores como el almacenamiento de energía o los vehículos eléctricos, aparte de sus otros muchos usos electrónicos. Un gran número de países llevan años garantizando sus recursos de litio mediante acuerdos con los países exportadores donde se encuentran las minas de este mineral, como Australia, Argentina, Brasil, Chile o China. Mientras estos países explotan sus recursos de litio y los exportan a Europa, Rusia o Estados Unidos, existen otras reservas aún sin utilizar, como es el caso de Bolivia, país que posee uno de los mayores yacimientos de litio (aproximadamente una cuarta parte de los recursos mundiales) o, a menor escala, de Ucrania. Históricamente, la competencia por el control de un recurso mineral ha dado lugar a rivalidades geopolíticas. En la actualidad esto es más evidente que nunca, dado que se prevé que la exponencial demanda mundial de litio aumente aún más en los próximos años, con una necesidad de almacenamiento de energía incuestionable en el mercado de la movilidad eléctrica.

Pero, ¿cómo determinar qué materias primas son críticas? El término «crítico» suele basarse en factores como la disponibilidad geográfica, el valor económico, la calidad de los recursos naturales, los desequilibrios entre la oferta y la demanda, y/o los esfuerzos de extracción. Por ello, también es habitual que la mayoría de los materiales críticos sean minerales o metales. Materiales como el vidrio, el plástico y el aluminio no se consideran materiales críticos porque el recurso está disponible y goza de una amplia distribución. Otras características de los materiales críticos podrían ser su toxicidad o su dificultad para degradarse o reciclarse.

El litio, un material clave para sectores como el almacenamiento de energía o los vehículos eléctricos, aparte de sus otros muchos usos electrónicos

En 2008, la Comisión Europea puso en marcha la **Iniciativa Europea sobre Materias Primas**, una estrategia integrada que establecía medidas específicas para garantizar y mejorar el acceso a la mayor parte de las materias primas críticas para la UE. Se basaba en:

- **Un suministro justo y sostenible de materias primas desde los mercados internacionales.**
- **Fomentar un suministro sostenible dentro de la UE.**
- **Impulsar la eficiencia de los recursos y promover el reciclaje.**

Para lograrlo, era necesario conocer las materias primas críticas esenciales para la economía europea, comprender sus existencias, flujos y su mercado, e identificar los potenciales cuellos de botella en su suministro.

La siguiente tabla muestra los principales proveedores mundiales de una lista de materias primas críticas seleccionadas por la UE. Podemos ver que casi el 60% de los materiales analizados se extraen en China. Otros proveedores dominantes son Sudáfrica y Estados Unidos.



Tabla 1.
Principales países suministradores de materias primas críticas – materiales individuales.

Material	Etapa	Principal proveedor mundial	Cuota	Material	Etapa	Principal proveedor mundial	Cuota
1 Antimonio	E	China	74%	23 Magnesio	P	China	89%
2 Barita	E	China	38%	24 Grafito natural	E	China	69%
3 Bauxita	E	Australia	28%	25 Caucho natural	E	Tailandia	33%
4 Berilio	E	USA	88%	26 Neodimio	E	China	86%
5 Bismuto	P	China	80%	27 Niobio	P	Brasil	92%
6 Borato	E	Turquía	42%	28 Paladio	P	Rusia	40%
7 Cerio	E	China	86%	29 Roca fosfórica	E	China	48%
8 Cobalto	E	RD Congo	59%	30 Fósforo	P	China	74%
9 Carbón de coque	E	China	55%	31 Platino	P	Sudáfrica	71%
10 Disproso	E	China	86%	32 Praseodimio	E	China	86%
11 Erbio	E	China	86%	33 Rodio	P	Sudáfrica	80%
12 Europio	E	China	86%	34 Rutenio	P	Sudáfrica	93%
13 Fluorita	E	China	65%	35 Samario	E	China	86%
14 Gadolinio	E	China	86%	36 Escandio	P	China	66%
15 Galio	P	China	80%	37 Metal de silicio	P	China	66%
16 Germanio	P	China	80%	38 Tantalio	E	RD Congo	33%
17 Hafnio	P	Francia	49%	39 Terbio	E	China	86%
18 Ho, Tm, Lu, Yb	E	China	86%	40 Titanio	P	China	45%
19 Indio	P	China	48%	41 Tungsteno	P	China	69%
20 Iridio	P	Sudáfrica	92%	42 Vanadio	E	China	39%
21 Lantano	E	China	86%	43 Itrio	E	China	86%
22 Litio	P	Chile	44%	44 Estroncio	E	España	31%

Leyenda

Etapa E = Etapa de extracción P = Etapa de procesamiento

HREEs Disproso, erbio, europio, gadolinio, holmio, lutecio, terbio, tulio, iterbio, itrio

LREEs Cerio, lantano, neodimio, praseodimio y samario

PGMs Iridio, paladio, rodio, rutenio

El acceso a estas materias primas críticas no solo depende de la disponibilidad geográfica, sino también de la viabilidad y la voluntad de extraerlas. En 2020, Europa representaba sólo el 5% de las actividades mineras mundiales y es la única región del mundo con una industria minera en declive. A día de hoy sigue dependiendo de las importaciones extranjeras para más del 80% de todas las materias primas necesarias para su industria y economía. Esta dependencia de las importaciones la hace vulnerable a las crisis y rivalidades económicas y geopolíticas. Las únicas materias primas de las que un Estado miembro de la UE es el principal productor mundial son el hafnio (Francia), el estroncio (España), el corcho natural (Portugal) y la perlita (Grecia).

Este es uno de los factores que ha motivado este estudio. La transición energética limpia y la independencia energética de Europa están condicionadas por la disponibilidad de materiales y el desarrollo tecnológico y requieren una gestión al final de su vida útil para que continúe siendo limpia en el futuro. Como piedra angular del Pacto Verde Europeo, la UE ha aprobado ambiciosos objetivos de neutralidad climática para 2050, así como la ya mencionada reducción neta del 55% de las emisiones para 2030 en comparación con 1990. Los argumentos a favor de una rápida transición energética limpia no han sido nunca tan firmes y claros como en la actualidad, sin olvidar los aspectos medioambientales que son el detonante clave de toda esta cuestión.



**representación de Europa
en actividades mineras
mundiales en 2020**

Como parte de la estrategia de la UE para reducir el aumento de la demanda de materias primas críticas, los Estados miembros están centrando sus esfuerzos en la introducción de una economía circular con un mayor reciclaje y reutilización de las materias primas críticas, la diversificación de las importaciones y la expansión de la minería nacional en Europa. Con respecto a este último punto, existe un importante conflicto de intereses y objetivos estratégicos, en el que se debe encontrar el equilibrio adecuado entre la protección local de la naturaleza y el medio ambiente y la mitigación efectiva y sostenible del cambio climático global. Ambos objetivos tienen una importancia significativa y deben coexistir para lograr un objetivo de mayor alcance. La escasa aceptación de las actividades mineras en Europa aumentará aún más la necesidad de una correcta gestión al final de la vida útil para recuperar los materiales críticos.

Para que los objetivos estratégicos mencionados se alcancen eficazmente, la UE deberá contar con un liderazgo político sólido, una orientación y un apoyo normativo adecuado, así como con estrategias de comunicación pública. En este estudio nos centraremos en presentar las opciones de tratamiento al final de la vida útil existentes en las industrias solar, eólica y de baterías. Asimismo, analizaremos las tendencias previstas, teniendo en cuenta que actualmente se está produciendo una clara evolución en este sector en Europa. Hasta la fecha, no existen datos oficiales sobre el volumen de residuos producidos o reciclados en ninguna de las tres industrias, pero tal como se expondrá en las siguientes páginas, en los próximos años se producirá un aumento considerable de la capacidad instalada de tecnologías limpias. Así pues, evitar la eliminación en vertederos es una estrategia con un doble propósito: reducir el impacto medioambiental y recuperar materiales valiosos. Por este motivo, Europa debe realizar un importante esfuerzo en los próximos diez años si pretende desarrollar un mercado capaz de satisfacer las necesidades de la industria del reciclaje.

Considerando la vida útil de los primeros aerogeneradores y módulos fotovoltaicos instalados en Europa y teniendo en cuenta que afrontamos una era en la que será necesario gestionar grandes cantidades de residuos renovables, debemos garantizar que se realiza una correcta gestión del final de la vida útil de estos componentes. Esta es la única fórmula para garantizar que las energías renovables sean limpias, no sólo en términos de emisiones, sino también de residuos físicos. En realidad, los residuos en sí no son necesariamente el problema, más bien la naturaleza de los mismos. Además, determinados materiales pueden provocar un grave cuello de botella que podría beneficiarse de una estrategia adecuada de reutilización, reparación y reciclaje de la mayoría de los componentes. Esta estrategia, más conocida como 3R, debería aplicarse no sólo a la capacidad de generación de energía existente, sino también a las instalaciones futuras a partir de la fase de diseño. Este es uno de los motivos por los que los países europeos y las empresas privadas se interesan por las soluciones de reciclaje; desde los responsables de la toma de decisiones hasta el público en general, existe una clara demanda de que las tecnologías renovables cumplan con las más estrictas normas medioambientales y de economía circular.

La cuantificación del impacto medioambiental de estas tecnologías suele realizarse mediante un análisis del ciclo de vida (ACV), un método para calcular el perfil medioambiental de los bienes y servicios que analiza todos los procesos que intervienen en la fabricación de un producto. Dependiendo del componente y del valor de los materiales que pueden recuperarse, las vías para una estrategia de 3R pueden variar significativamente. No existe una solución universal. En algunos casos, existirán posibles soluciones de mercado independientes; en otros, la regulación y los mecanismos de apoyo desempeñarán un papel fundamental. En este sentido, se realizará un análisis de toda la cadena de valor para explorar otras fuentes de residuos o materiales reciclables.

En este estudio, la gestión eficaz del final de la vida útil en el sector de las

energías renovables se presenta como una necesidad para la transición energética, así como para la independencia energética de Europa. A lo largo de los próximos capítulos, se evaluará el principio de la economía circular en los ámbitos de la energía solar fotovoltaica, la energía eólica y las baterías, en consonancia con su valor geoestratégico.

Para cada tecnología, nuestro análisis comenzará con un estudio de la demanda prevista de materiales. Para ello, utilizaremos las perspectivas del mercado, tanto para Europa como para España. Estas perspectivas deberán traducirse en una demanda de materiales o componentes y en su retirada para evaluar el impacto.

Ciertas áreas de especial interés son las tierras raras y los materiales compuestos, ya que todos los demás materiales (hormigón, acero, cobre, aluminio, ...) se consideran viables en términos de 3R, con diferentes empresas que ya prestan sus servicios. Para los materiales más críticos, examinaremos las principales soluciones técnicas que se están desarrollando.

La legislación es una piedra angular fundamental en la búsqueda de una economía circular integral relacionada con el sector de las energías renovables. En algunos casos, la normativa ya existe; en otros, sigue pendiente su desarrollo. Además, la industria de ciertos materiales específicos va un paso por delante de la legislación, con el objetivo de encontrar soluciones que mejoren la aceptación social y la huella de ACV de sus productos.

Por último, como se ha anticipado, los costes de cualquier enfoque 3R deben ser incorporados al análisis. Es de esperar que, en la mayoría de los casos, exista un enfoque empresarial que aporte una solución natural. En otros casos, sin embargo, será necesario diseñar y aplicar un mecanismo de apoyo.

1

Energía solar fotovoltaica

1.1 Introducción a la gestión al final de la vida útil del mercado de la energía solar

- 1.1.1 Materiales y composición de los paneles fotovoltaicos
- 1.1.2 Análisis de la implantación prevista de paneles fotovoltaicos
- 1.1.3 Previsión de generación de residuos fotovoltaicos
- 1.1.4 Diferentes iniciativas para abordar el problema

1.2 Tecnologías para el reciclaje de paneles fotovoltaicos

1.3 Normativa de la gestión de residuos fotovoltaicos

- 1.3.1 Introducción a la Directiva RAEE
- 1.3.2 Aplicación de la Directiva RAEE
- 1.3.3 El reto de realizar un seguimiento de los residuos fotovoltaicos
- 1.3.4 Normativa en vigor en España

1.1 Introducción a la gestión al final de la vida útil del mercado de la energía solar

Como veremos en esta sección, debido al rápido aumento de la implantación de la energía fotovoltaica en los próximos años, el mercado de la energía solar tendrá que enfrentarse al reto de la gestión del final de la vida útil de sus productos. La huella de carbono de la industria fotovoltaica se deriva de la extracción y producción de componentes, las emisiones generadas en el transporte y la gestión del fin de la vida útil de los módulos. Aunque el objetivo final es minimizar todas las fuentes de contaminación directas e indirectas, en este estudio nos centraremos en evaluar las alternativas de fin de la vida útil del sector fotovoltaico en Europa y en España.

La regla 3R (reducir, reutilizar, reciclar) también es de aplicación al sector fotovoltaico. Sin embargo, dado que los paneles fotovoltaicos están fabricados con materiales valiosos, tóxicos y con costosos procesos de producción, antes de buscar soluciones de reciclaje es necesario considerar otras alternativas que permitan reducir el uso de materiales, sustituirlos por otros menos críticos o alargar la vida de los módulos. Entre estas soluciones se encuentran:

• Reducir

Gracias a los avances experimentados por la tecnología fotovoltaica en décadas anteriores y el papel relevante del desarrollo de la I+D, la eficiencia de los paneles ha aumentado notablemente, reduciéndose de forma significativa el aporte de materia prima en su composición. Hoy en día, aunque la composición sigue siendo muy similar, los paneles modernos son mucho más eficientes energéticamente y utilizan

Gracias a los avances experimentados por la tecnología fotovoltaica en décadas anteriores y el papel relevante del desarrollo de la I+D, la eficiencia de los paneles ha aumentado notablemente, reduciéndose de forma significativa el aporte de materia prima en su composición



menos material, lo que implica un menor impacto medioambiental y una menor generación de residuos en el futuro. También se han mejorado las técnicas de producción, y los expertos se centran en reducir el uso de materiales críticos. Por ejemplo, hace unos meses, una empresa emergente australiana, SunDrive, alcanzó un récord de eficiencia del 26% en una celda solar sustituyendo la plata utilizada en las celdas fotovoltaicas convencionales por cobre, más barato y abundante. Se trata de un hito clave en esta destacada línea de actuación para mejorar el impacto medioambiental y económico de la industria fotovoltaica.

• Reutilizar

La clave de la reutilización de los módulos fotovoltaicos es garantizar un nivel de rendimiento y vida útil restante que cumpla con un estándar mínimo de calidad y seguridad. El problema actual es que no existen tales normas, lo que impide determinar si los módulos en cuestión son aptos para su reutilización o si deben gestionarse como residuos. Existen iniciativas que pretenden establecer estas normas para evitar situaciones irregulares en las que las entidades oficiales de recogida de paneles fotovoltaicos envían grandes cantidades de módulos fotovoltaicos a países en desarrollo alegando que serán reutilizados, cuando en realidad se trata de simples residuos que deberían haber sido gestionados y reciclados localmente. Una vez se establezcan las normas a nivel europeo, será necesario diseñar una línea de pruebas a nivel industrial para comprobar los requisitos técnicos de reutilización mencionados.

• Reciclar

Aunque hasta la fecha Europa ha puesto en marcha iniciativas para recuperar algunos componentes tóxicos como el cadmio, esto no es suficiente. No se recuperan componentes como la plata, el cobre, el silicio y el plomo, por lo que se pierde la mayor parte de su valor potencial y se incrementa el impacto medioambiental del módulo. De hecho, el reciclaje de paneles fotovoltaicos

es una operación muy factible y no especialmente complicada desde el punto de vista técnico, con tasas de recuperación muy elevadas. La posibilidad de reutilizar estos elementos supondría un importante ahorro energético y económico.

Aunque hasta la fecha Europa ha puesto en marcha iniciativas para recuperar algunos componentes tóxicos como el cadmio, esto no es suficiente. No se recuperan componentes como la plata, el cobre, el silicio y el plomo, por lo que se pierde la mayor parte de su valor potencial y se incrementa el impacto medioambiental del módulo

1.1.1 Materiales y composición de los paneles fotovoltaicos

Las tres principales tecnologías fotovoltaicas del mercado son: capa o película fina, silicio monocristalino y silicio policristalino, aunque dos tercios de los paneles fabricados a nivel mundial son de silicio cristalino. Hoy en día, la mayoría de los operadores del sector se remite al informe de IRENA de 2016 sobre la gestión del fin de la vida útil de los paneles fotovoltaicos para determinar la composición general de un módulo fotovoltaico estándar de silicio. Esta información se refleja en la siguiente tabla. A pesar de no disponer de publicaciones científicas más recientes para definir estos valores genéricos, tendremos en cuenta que se ha producido un aumento general de los precios de las materias primas en los últimos dos años, que podría afectar a las cifras indicadas en la Tabla 2.

Tabla 2.
Composición de un panel fotovoltaico de silicio. Pesos y valores relativos de cada material.
 Fuente IRENA.

	Parte del módulo	Peso relativo del material	Material	Valor relativo del material
Residuos no peligrosos	Encapsulante	75%	Vidrio	8%
	Estructura	10%	Polímero	-
	Marco	8%	Aluminio	26%
Residuos peligrosos	Célula fotovoltaica	5%	Silicio	11%
	Cableado	1%	Cobre	8%
	Metales semiconductores	1%	Plata	47%
			Plomo	-
			Indio	-
Estaño			-	

Mientras el marco y el vidrio representan casi el 80% del peso del panel, el valor relativo del material se distribuye de forma muy diferente. Por ejemplo, aunque la plata sólo representa el 0,5% de la masa, supone el 47% del valor económico total. En la actualidad, el 20% de la plata de todo el planeta se destina a la industria fotovoltaica. Se han propuesto varios escenarios y se han estudiado otros metales para sustituir a la plata, pero ninguno de ellos ofrece una eficacia similar. La producción de plata se ha mantenido estable durante los últimos veinte años, pero podría convertirse en un problema para el sector. Si se aumenta la capacidad de producción de módulos fotovoltaicos sin reducir el uso de plata por célula, se producirá una escasez de este metal en el mercado. También es necesario tener

en cuenta que Europa depende de la importación de plata. Por lo tanto, este es uno de los materiales críticos en la industria fotovoltaica.

 **20%**

de la plata de todo el planeta se destina a la industria fotovoltaica. Aunque sólo representa el 0,5% de la masa, supone el 47% del valor económico total

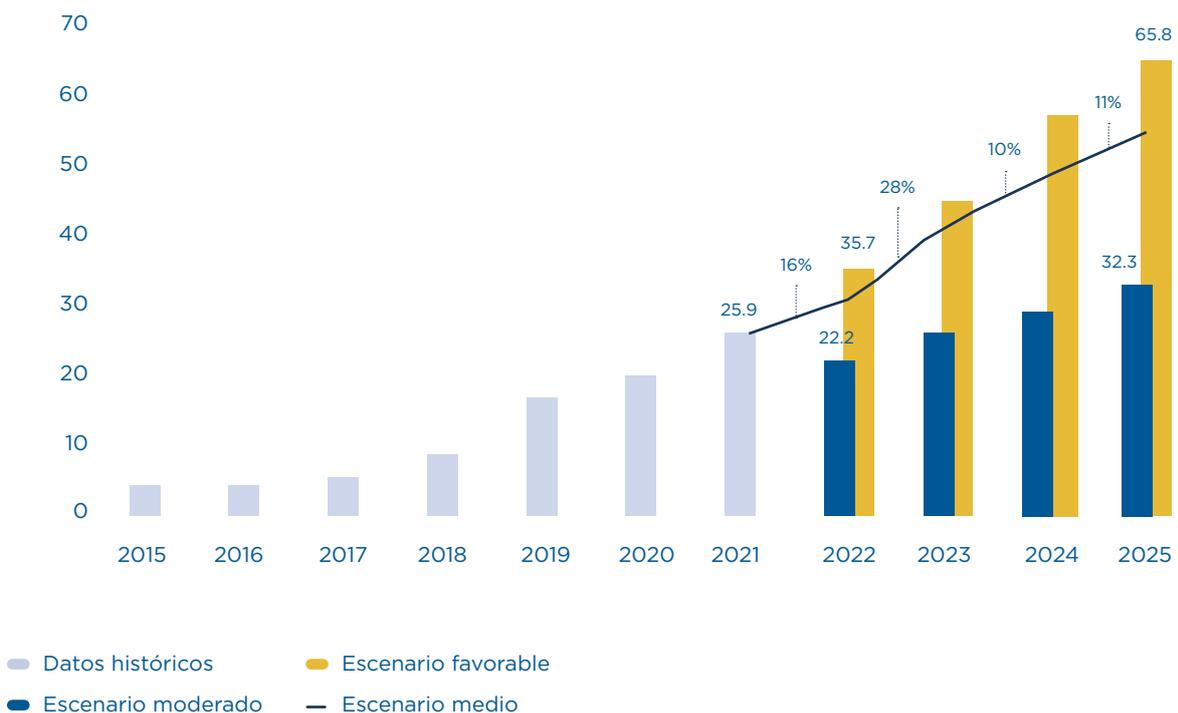
Otro caso es el del silicio, que también supone una parte mínima del peso, pero tiene un valor económico muy elevado si se recicla con un alto grado de calidad, compensando así su producción, que representa el 80% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero del panel. El silicio procede del cuarzo, y se obtiene tras fundirlo y tratarlo químicamente. Por lo general, la pureza resultante del silicio tras este proceso es de aproximadamente el 99%, y aún debe aumentar hasta 8 décimas más para alcanzar el índice fotovoltaico. Este proceso es extremadamente costoso y consume una gran cantidad de energía.

En cambio, los paneles de capa fina sólo contienen alrededor de un 2% de materiales peligrosos (cobre, zinc y otros semiconductores). Estos materiales suelen estar sujetos a rigurosos requisitos de tratamiento con clasificaciones específicas según la jurisdicción aplicable.

1.1.2 Análisis de la implantación prevista de paneles fotovoltaicos

Las tecnologías solares fotovoltaicas se han convertido en la tecnología energética de mayor crecimiento a escala mundial y juegan un papel importante a la hora de garantizar un suministro adecuado de electricidad descarbonizada. En 2021, a pesar de la escasez de suministro de materiales, los problemas logísticos y las consiguientes subidas de precios experimentadas por todos los Estados miembros, se instalaron 25,9 GW de energía fotovoltaica en la Unión Europea. Esto supone un aumento del 34% respecto a los 19,3 GW instalados el año anterior, y un nuevo récord desde 2011, sumando una capacidad total instalada actual de 165 GW.

Gráfico 2.
Escenarios del mercado fotovoltaico anual para 2022-2025 en los 27 Estados miembros.
Fuente IRENA.





Según las previsiones de Solar Power Europe para el mercado de la UE, el objetivo del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) era alcanzar una potencia de 335 GW en 2030, comenzando con una instalación de 30 GW en 2022. Este es el objetivo oficial, aunque los expertos consideran que es probable que esa implantación se supere mucho antes, con un escenario más realista de 328 GW de capacidad solar instalada en 2025. En línea con esto, la Comisión Europea plantea el objetivo de llegar al 40% de energías renovables en 2030. De este porcentaje, se estima que 479 GW procederán de la energía solar. Como se muestra en los gráficos 2 y 3, se han propuesto diferentes escenarios. Sin embargo, la industria reclama a la Comisión Europea y a los Estados miembros objetivos de mayor alcance para hacer frente al cambio climático y poder cumplir los objetivos del clima de París. En esta línea, el reciente Plan REPowerEU de la Comisión Europea,

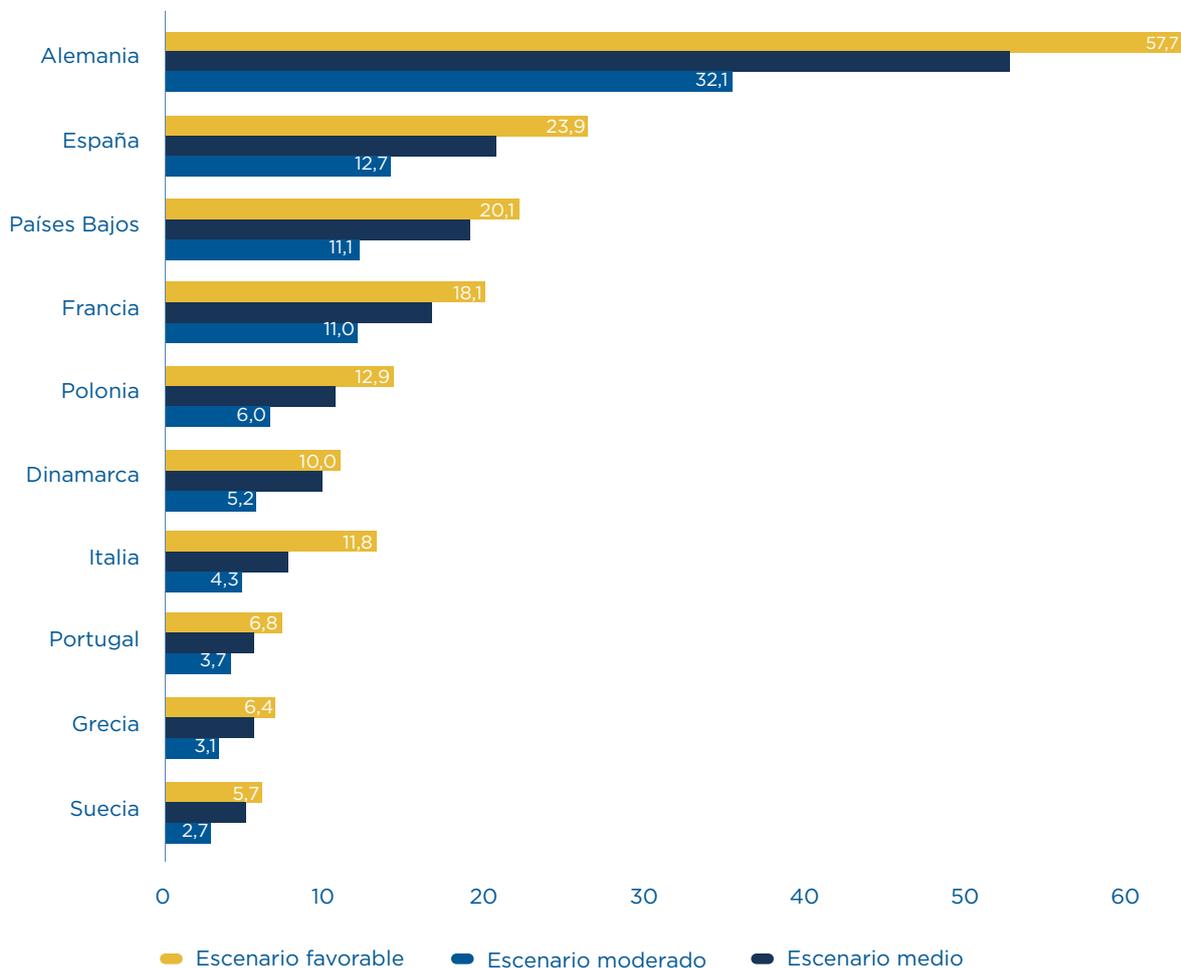
motivado por la reciente situación geopolítica, ha establecido nuevos objetivos más ambiciosos para aumentar la capacidad de adaptación del sistema energético de la Unión Europea en su conjunto.

El reciente Plan REPowerEU de la Comisión Europea, motivado por la reciente situación geopolítica, ha establecido nuevos objetivos más ambiciosos para aumentar la capacidad de adaptación del sistema energético de la Unión Europea en su conjunto

Como se muestra en el gráfico 3, España ha conservado su segundo puesto en Europa, con una capacidad estimada de 3,8 GW en 2021, ligeramente superior a la del año anterior. De ellos, 3 GW proceden de sistemas basados en Acuerdos de Compraventa de Energía (PPA por sus siglas en inglés), que representan uno de los mayores mercados mundiales de energía solar no subvencionada. En los próximos años, un segmento emergente clave para la energía fotovoltaica en España serán los tejados de autoconsumo, que ayudarán a alcanzar el objetivo de instalación de 18,9 GW en 2025. El

Ministerio de Energía español creó en 2018 la Comisión de Expertos en Transición Energética (CETE) para analizar las opciones de España a la hora de definir una estrategia que le permita cumplir con los objetivos medioambientales de la UE, al tiempo que persigue la maximización del bienestar de sus ciudadanos. En su informe, recientemente publicado, los escenarios sobre la evolución del sector energético nacional en una economía de bajas emisiones de carbono sugieren que la capacidad fotovoltaica nacional instalada podría alcanzar hasta 90 GW en 2050.

Gráfico 3.
Los 10 principales productores de energía fotovoltaica en la UE en 2022-2025.
 Fuente: SolarPower Europe 2021



Más concretamente, en España el CIEMAT ha elaborado uno de los estudios más completos para prever la implantación fotovoltaica nacional y los consiguientes residuos generados. En el gráfico 4 se resume la evolución de la potencia fotovoltaica española contemplada en las dos previsiones presentadas en el estudio:

- Previsión de ENTSO:** combina el escenario de generación distribuida propuesto por la Red Europea de Gestores de Redes de Transporte de Electricidad (ENTSO-E por sus siglas en inglés) con el escenario base propuesto por el Comité de Expertos en Transición Energética (CETE). Este escenario de ENTSO prevé una capacidad fotovoltaica de 47 GW en España en 2030, impulsada por un notable aumento de la generación a pequeña escala y del autoconsumo fotovoltaico, en sintonía con algunas de las nuevas políticas energéticas nacionales. El escenario del CETE utiliza un modelo de optimización que establece la combinación de tecnologías más baratas que cubra la demanda energética nacional prevista, lo que llevaría a 90 GW en 2050. En esta proyección de ENTSO se asume un crecimiento exponencial de la capacidad fotovoltaica acumulada en el periodo 2020-2030, seguido de un crecimiento lineal en el periodo 2030-2050.
- Previsión de BNEF:** basada en un enfoque diferente del Comité de Expertos en Transición Energética que tiene en cuenta la previsión de Bloomberg New Energy Finance (BNEF) para el periodo 2020-2030. Esta proyección de BNEF considera que la elevada demanda de nuevas instalaciones fotovoltaicas podría provocar problemas en la cadena de suministro, limitando el desarrollo de la capacidad fotovoltaica acumulada en España a 26 GW en 2030. Esta previsión coincide con el escenario elaborado por la Comisión Europea en 2014 para alcanzar los objetivos climáticos y energéticos. En esta proyección de BNEF, se asume un crecimiento lineal en el periodo 2020-2050, lo que llevaría a una capacidad fotovoltaica de 61 GW en 2050.

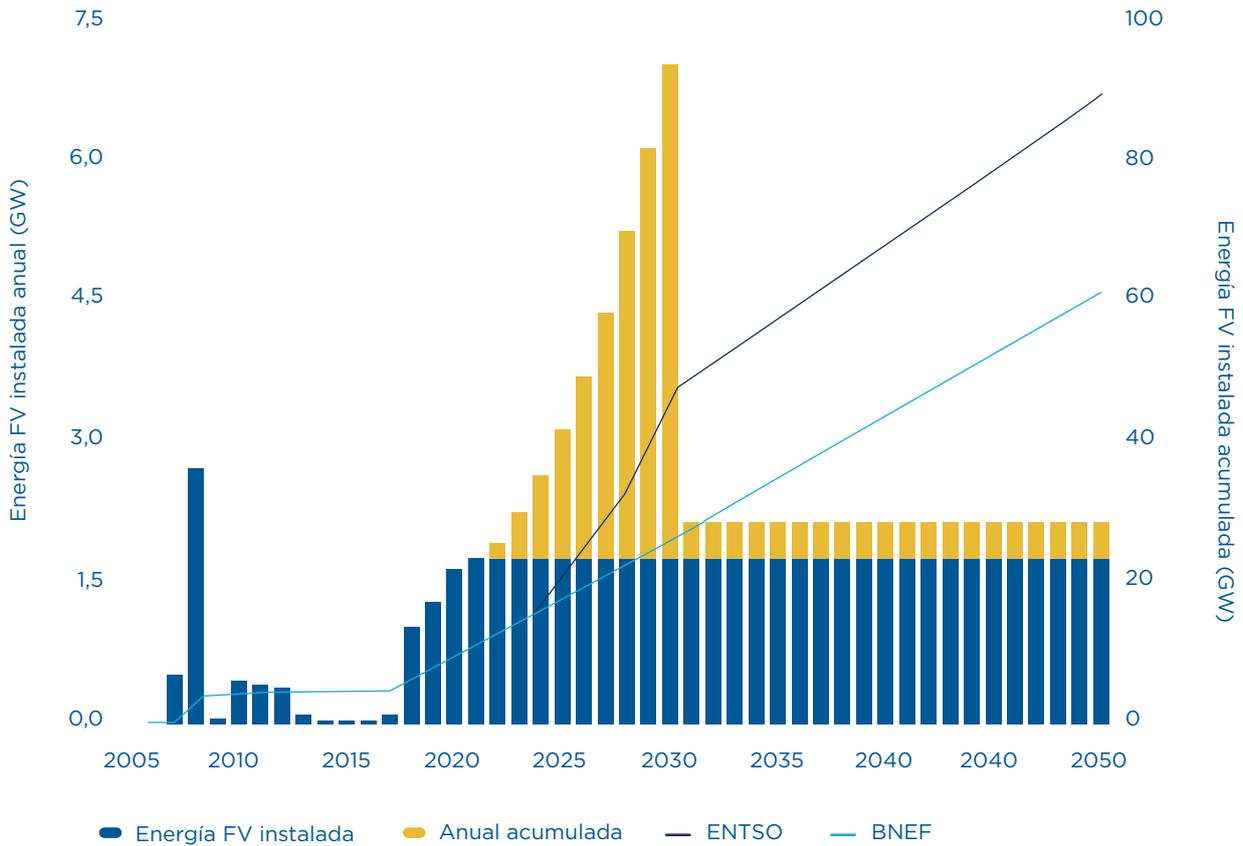


61

GW en 2050. Se asume un crecimiento lineal en el periodo 2020-2050, lo que llevaría a una capacidad fotovoltaica de 61 GW en 2050 (Previsión de BNEF)

Gráfico 4.

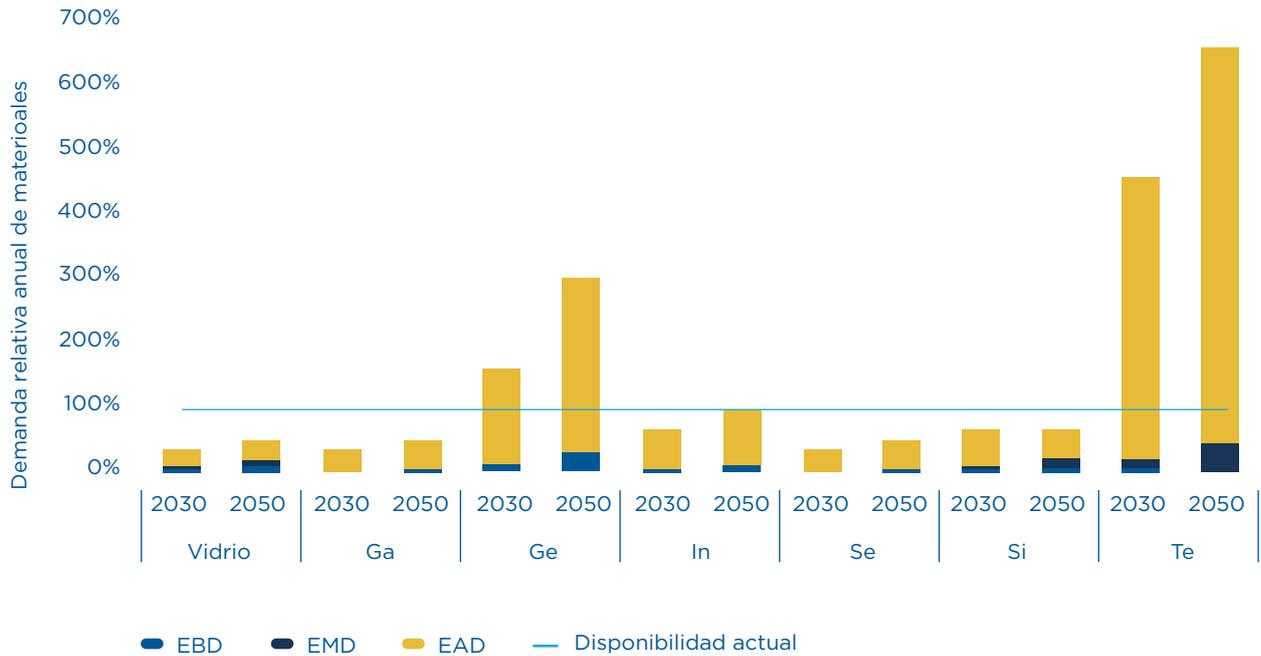
Evolución de la capacidad fotovoltaica instalada anual y acumulada para los dos escenarios elegidos por el comité de expertos. La potencia fotovoltaica anual instalada a partir de 2018 se aproxima inicialmente al incremento anual de la capacidad fotovoltaica acumulada, sin considerar las necesidades de repotenciación.



De este análisis podemos concluir que la demanda fotovoltaica aumentará notablemente en las próximas décadas. ¿Limitará la disponibilidad de las materias primas requeridas por este sector este crecimiento necesario? No es fácil de prever a día de hoy, puesto que la demanda de materiales para la energía solar fotovoltaica experimenta grandes fluctuaciones, ya que depende de la cuota de mercado relativa de cada tecnología. Por el momento, aunque no se prevén grandes problemas de suministro, algunos escenarios a nivel mundial predicen una mayor presión sobre varios materiales, en particular el germanio, el telurio, el indio, el selenio y el silicio.

Por el momento, aunque no se prevén grandes problemas de suministro, algunos escenarios a nivel mundial predicen una mayor presión sobre varios materiales, en particular el germanio, el telurio, el indio, el selenio y el silicio

Gráfico 5.
Relación entre la demanda y la oferta mundial de materiales para el sector FV en 2030 y 2050: niveles de demanda cercanos a la disponibilidad actual.

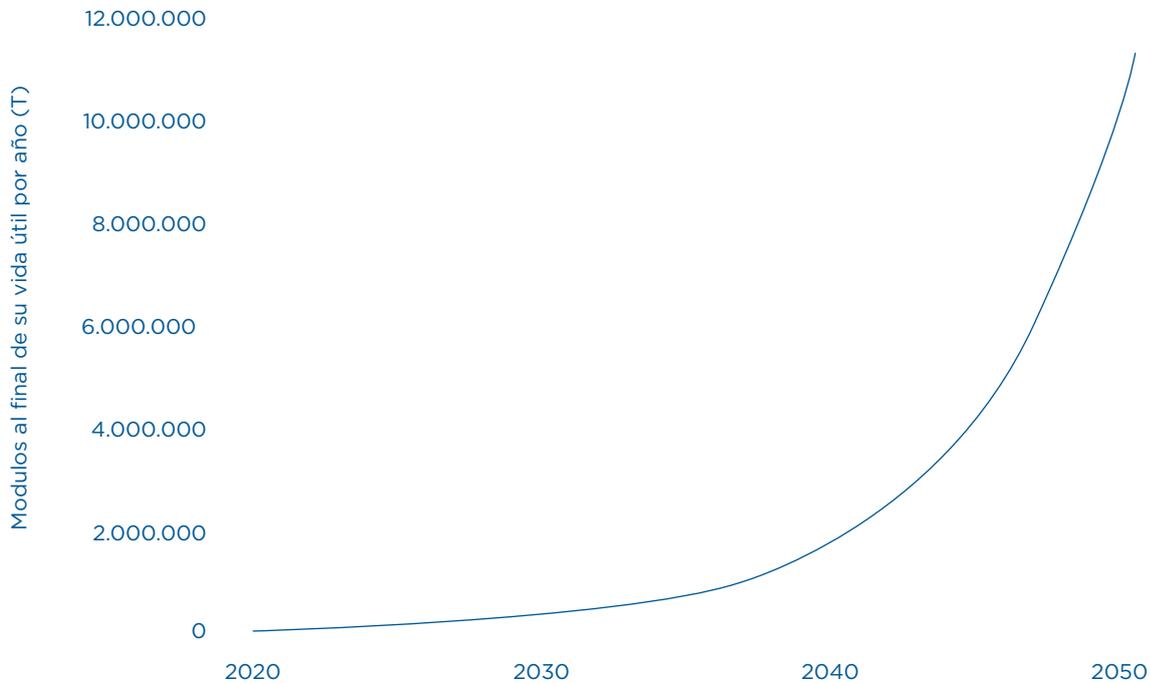


1.1.3 Previsión de la generación de residuos fotovoltaicos

Independientemente del escenario en el que nos centremos, la realidad es que la industria fotovoltaica se encuentra aún en una fase de crecimiento. Con la gran cantidad de módulos fotovoltaicos que se instalan cada año, surge una pregunta

clave: ¿qué ocurre con los paneles solares cuando llegan al final de su vida útil? Este es un elemento que no se debe ignorar: los módulos tendrán que ser sustituidos o eliminados en algún momento. Para contribuir al máximo a la protección del clima y a la conservación de los recursos, la reutilización y el reciclaje desempeñan un papel fundamental en el cierre de los ciclos.

Gráfico 6.
Residuos anuales de módulos fotovoltaicos previstos en Europa.



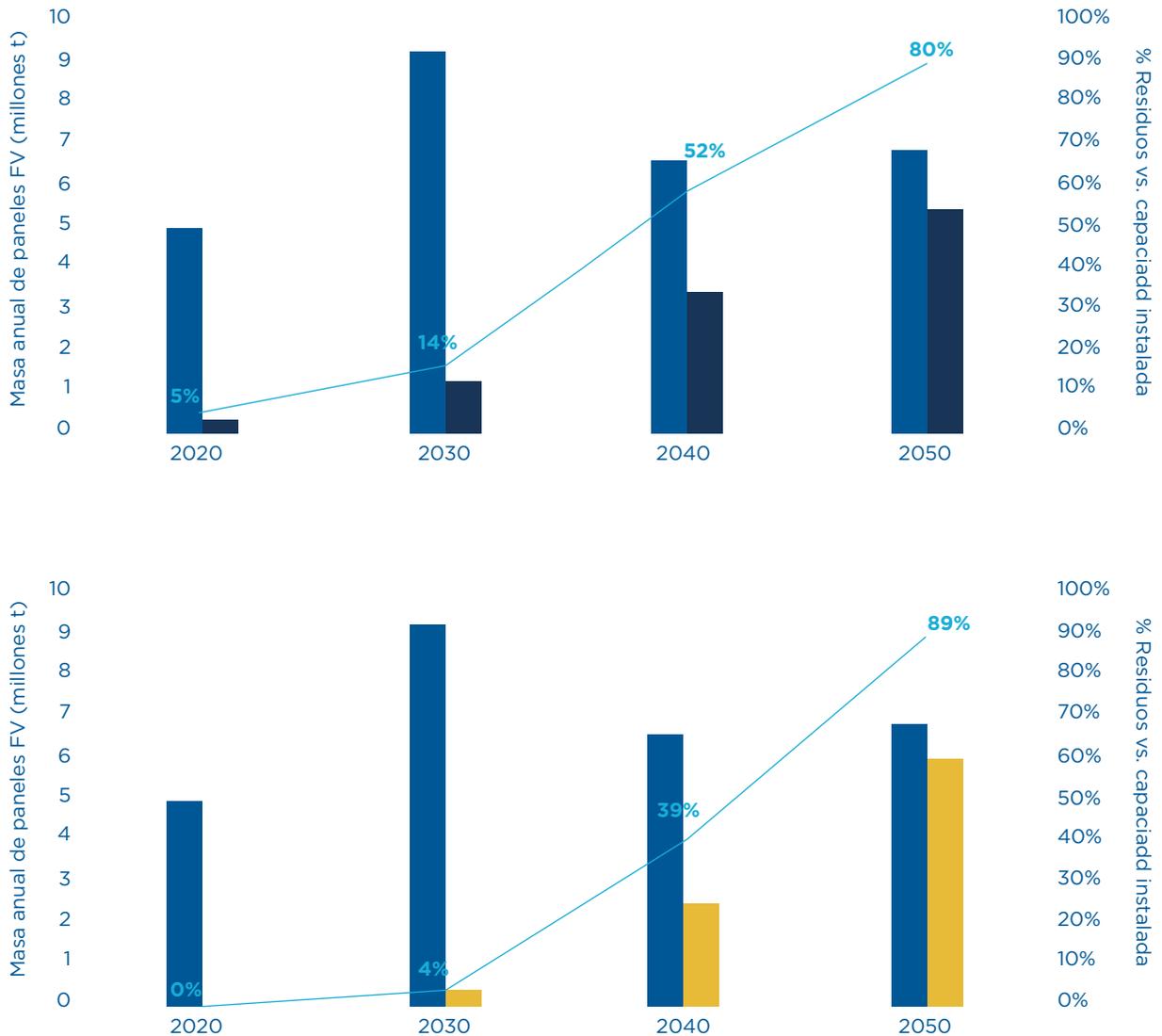
Teniendo en cuenta los objetivos de instalación, y considerando una vida útil de 20-25 años, además de las sustituciones de paneles defectuosos y las iniciativas de repotenciación debidas a la mejora de la eficiencia, en los próximos años podemos esperar un crecimiento exponencial de los sistemas fotovoltaicos que llegan al final de su vida física y, en algunos casos, económica. Algunas estimaciones prevén una cantidad de hasta un millón de toneladas de módulos obsoletos para 2030. Por lo tanto, es urgente que desarrollemos hoy el escenario oportuno para que las estructuras de recogida y eliminación sean adecuadas en el futuro, de modo que se puedan afrontar las emisiones de gases de efecto invernadero relacionadas con la energía fotovoltaica.

En 2016, IRENA presentó un informe con las primeras previsiones de residuos fotovoltaicos. En él se preveía que Europa sería el segundo mercado de residuos fotovoltaicos de mayor dimensión del mundo después de Asia, con una previsión de residuos de hasta tres millones de

toneladas para 2030. En aquel momento se preveía que Alemania acumularía entre 400.000 y un millón de toneladas de residuos de paneles fotovoltaicos en 2030, una cantidad que ha aumentado notablemente debido a una mayor implantación real en comparación con las previsiones realizadas en 2016. Asimismo, se estimó que Italia y Francia también producirían volúmenes significativos de residuos fotovoltaicos.

A partir de las predicciones más recientes de Solar Power Europe, el cálculo de los residuos fotovoltaicos anuales producidos en Europa frente a la capacidad instalada alcanzará entre el 4% y el 14% en 2030, dependiendo del escenario, con alrededor de un millón de toneladas de residuos y nueve millones de toneladas de nueva capacidad. Y lo que es más relevante y merece la pena observar son las cifras de 2050, donde se espera que se alcance una proporción del 80%, con sólo un millón de toneladas menos de residuos que de nueva capacidad instalada.

Gráfico 7.
Paneles fotovoltaicos instalados anualmente y al final de su vida útil (2020-2050)
Escenarios de pérdida temprana y pérdida regular.



En lo que respecta a España también existen previsiones específicas, como la publicada más recientemente en el Journal of Cleaner Production en 2018, donde se evalúa el volumen de residuos fotovoltaicos en base a las proyecciones de capacidad fotovoltaica acumulada en un escenario español 100% renovable en 2050. Este estudio predice un volumen acumulado de residuos fotovoltaicos que oscila entre 70.000 y 300.000 toneladas para 2030,

derivado de los módulos fotovoltaicos instalados en 2007-2008; y del orden de entre uno a dos millones de toneladas para 2050, con valores que dependen de la previsión de capacidad fotovoltaica. Este es un claro llamamiento a la acción para el sector del reciclaje fotovoltaico en España, que se prevé sea uno de los países líderes en la generación de residuos fotovoltaicos en la UE.

1.1.4 Diferentes iniciativas para abordar el problema

Aunque hasta la fecha el final de la vida útil de los módulos fotovoltaicos no se ha gestionado debidamente, numerosas entidades e iniciativas en Europa y en todo el mundo tratan de resolver el problema. Un ejemplo es el Programa de Sistemas de Energía Fotovoltaica de la Agencia Internacional de la Energía (IEA PVPS por sus siglas en inglés), que ha reunido a más de 30 miembros internacionales del sector para llevar a cabo una serie de proyectos de investigación conjuntos en materia de aplicación de sistemas de energía fotovoltaica, designando distintas «tareas» que pueden ser proyectos de investigación o áreas de actividad. En este ámbito, la tarea 12 se centra en la sostenibilidad de la energía fotovoltaica y abarca estudios relevantes sobre la cuantificación del perfil medioambiental a través de los ACV, las opciones de gestión al final de la vida útil y las cuestiones de salud y seguridad medioambiental que son importantes para el crecimiento del mercado. Según este estudio, a pesar de la motivación económica de desmantelar los paneles antes de su vida útil (debido a las pérdidas de rendimiento y a la mayor eficiencia de los nuevos módulos), una técnica habitual conocida como repotenciación o renovación temprana, es más beneficioso para el medio ambiente mantener un panel en uso durante su vida útil de 30 años.

Esta misma iniciativa realizó un estudio en el que se recopiló información de diferentes plantas de recogida y reciclaje de residuos fotovoltaicos de toda Europa, llegando a las siguientes conclusiones respecto a la situación real del mercado:

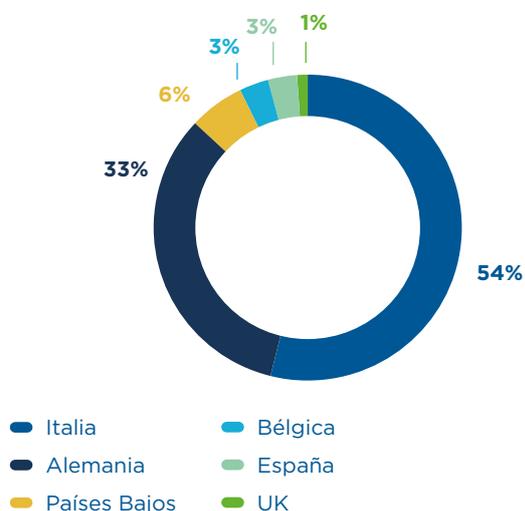
- Las tasas de reciclaje son bastante elevadas (74-95% del peso).
- Una gran mayoría utilizaba tratamientos mecánicos que limitaban la recuperación de materiales al aluminio del marco y al vidrio, pero no permitían recuperar los materiales críticos de mayor valor.

- Una minoría aplicaba técnicas más innovadoras basadas en tratamientos térmicos, que permitían eliminar el encapsulante y recuperar los materiales críticos, aumentando así la rentabilidad del proceso de reciclaje.

Dado que hasta la fecha el número de paneles que llegan al final de su vida útil en Europa es todavía limitado, por el momento se procesan en plantas de mayor tamaño con otros residuos electrónicos. Sin embargo, en 2018 se creó la primera planta de reciclaje fotovoltaico en Francia. La planta, gestionada por Veolia, procesó en su primer año 1.800 toneladas de residuos, con una capacidad de hasta 4.000 toneladas anuales. Los materiales recuperados en esta planta fueron: vidrio, aluminio, componentes electrónicos y cableado.

Según la Asociación PV CYCLE, que también participa en varios proyectos de I+D como CIRCUSOL, en los que la economía circular confluye con la energía solar, en los últimos años se ha producido una estabilización de la tasa de recogida, debido principalmente al mercado italiano, que ha continuado aumentando a pesar de la crisis causada por la Covid-19. Con 5.801 toneladas procesadas durante el año 2020, incluidas 1.492 toneladas de baterías, Italia ha aumentado sus operaciones en casi un 21%.

Gráfico 8.
Cantidades acumuladas de residuos fotovoltaicos recogidas por país.

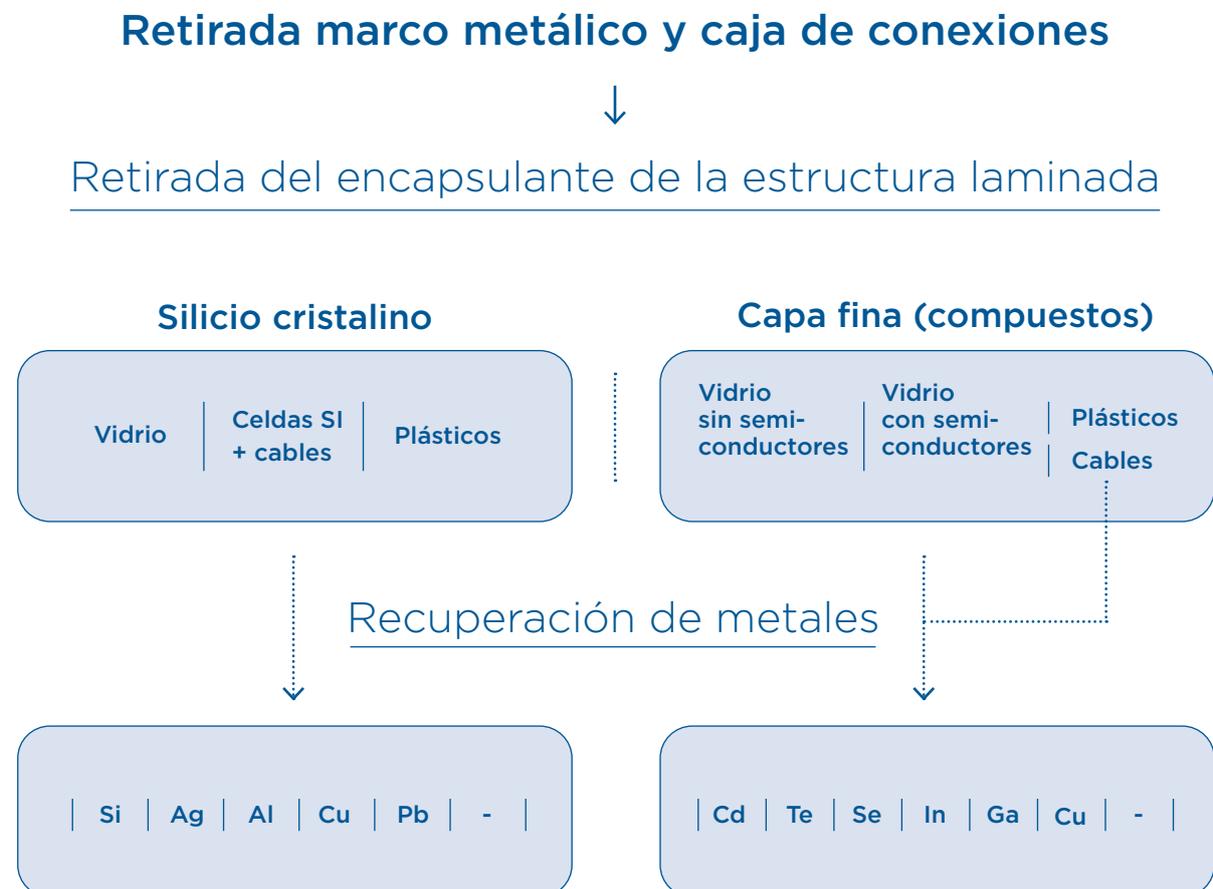


Como podemos ver, aunque la tasa de recuperación de los paneles fotovoltaicos parece elevada, las técnicas de reciclaje más utilizadas se limitan a la recuperación de los componentes más pesados de bajo valor económico. Poder recuperar los materiales críticos de alto valor, como el silicio, la plata, el cobre y el aluminio, es clave para crear un incentivo en el mercado del reciclaje fotovoltaico, tanto sostenible como económico.

1.2 Tecnologías para el reciclaje de paneles fotovoltaicos

En el gráfico 9 se indican los pasos básicos en el proceso de tratamiento de un módulo fotovoltaico, diferenciando las estructuras de silicio de las de capa fina. Como explicaremos en esta sección, existen diferentes técnicas para la recuperación de materiales. Sin embargo, en todos los casos el proceso de mayor importancia y dificultad es la retirada del encapsulante de las estructuras laminadas.

Gráfico 9.
Proceso de separación para el reciclaje de módulos fotovoltaicos.



1. Retirada del marco metálico y la caja de conexiones → este primer paso es puramente mecánico, aunque es esencial realizarlo correctamente sin dañar el vidrio para poder reutilizarlo o venderlo. Para este paso se suele utilizar maquinaria específica, como un cilindro neumático que utiliza aire para retirar el mar

2. Retirada del encapsulante → separando el vidrio, los polímeros, las células de silicio y otros metales, y recuperando las células fotovoltaicas sin que se fracturen. Existen diferentes procesos para realizarlo:

a. Proceso térmico

Consiste en un proceso de combustión o craqueo: los módulos fotovoltaicos se calientan en un horno a 500-600°C, temperatura a la cual se funden los componentes poliméricos y los materiales restantes, como las células de silicio, el vidrio y los metales pueden separarse. Los materiales separados se reciclan posteriormente.

b. Proceso mecánico

El método mecánico para el procesamiento de los módulos fotovoltaicos suele incluir la trituración, el raspado del vidrio o de las capas y el corte de la capa de encapsulante. Estos métodos fragmentan las estructuras laminadas, con uno o varios pasos adicionales posteriores para separar el vidrio, los metales, incluidas las células de silicio, y los polímeros. Como se ha explicado anteriormente, hoy en día es muy común el uso de la trituración. Sin embargo, esta práctica pone en peligro la recuperación de los metales de la célula, ya que una vez que el vidrio se mezcla con los metales, ya no es posible recuperarlos. Existen otras técnicas mecánicas que impiden la contaminación del vidrio por la capa de encapsulado, tales como:

- Raspado mecánico
- Combinación de raspado mecánico y tratamiento químico.chemical

- Utilización de un procesamiento térmico.
- Utilización de equipos de rodillos y cuchillas vibratorias.
- Utilización de tecnología de trituración en condiciones de refrigeración.

c. Proceso químico

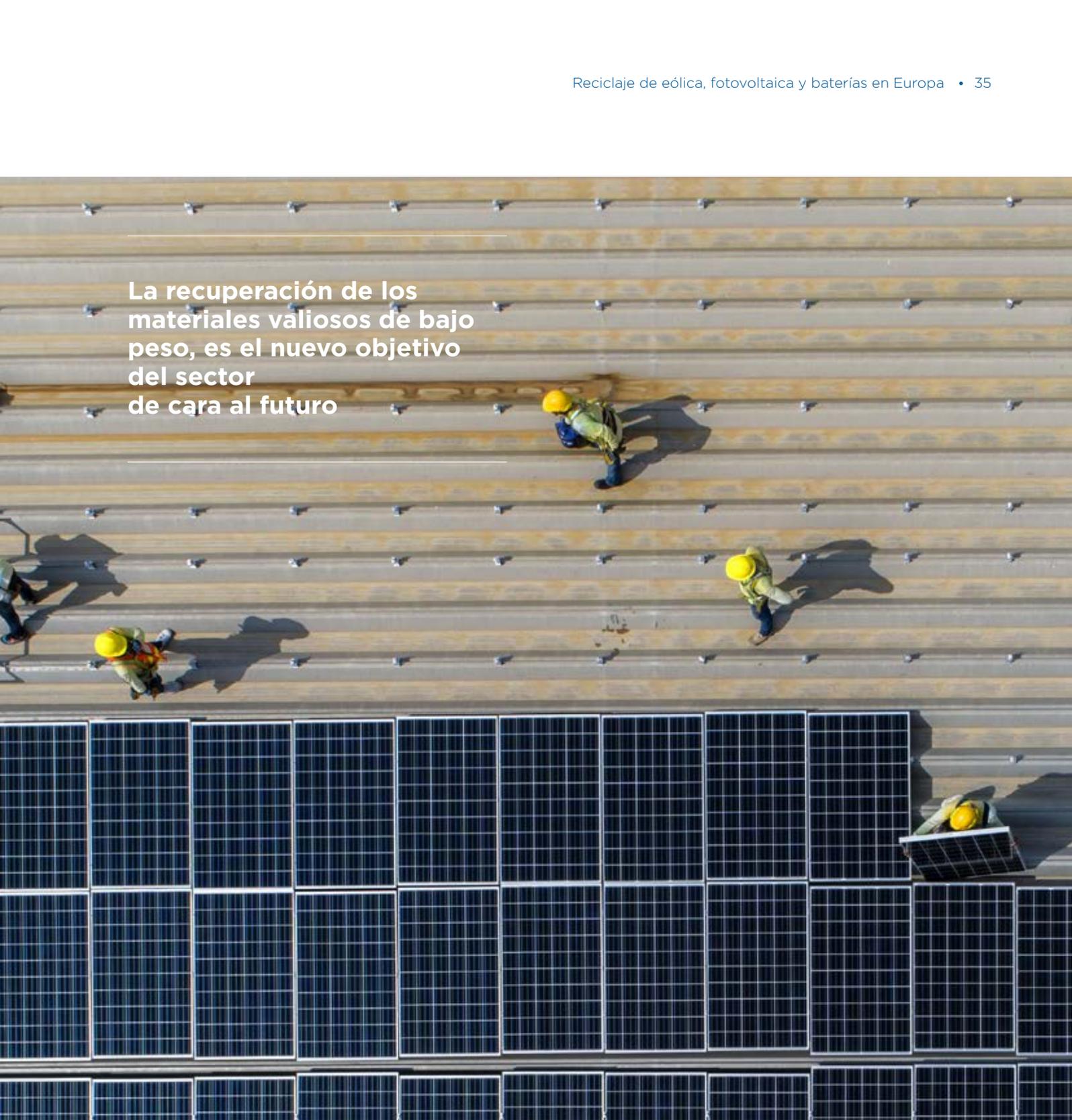
El método químico consiste en separar los componentes mediante el uso de disolventes, que disuelven la capa de encapsulante, permitiendo la separación del vidrio, la célula de silicio y los metales. Suele requerir más tiempo, pero estas técnicas presentan buenas tasas de recuperación de silicio. Una desventaja importante en este caso es la eliminación de los disolventes químicos tras el tratamiento. Por esta razón, se han realizado ensayos con disolventes orgánicos. Sin embargo, éstos sólo han demostrado ser eficaces antes del tratamiento térmico.

d. Proceso óptico

Este método consiste básicamente en cortar el encapsulante con un láser.

3. Recuperación de los metales → Tras la retirada de la capa de encapsulante, es posible recuperar los metales de las celdas de silicio mediante procesos químicos, lo que requiere un tratamiento adecuado de los residuos químicos resultantes. En algunos casos, este proceso se realiza directamente por una empresa de refinado de metales. Por término medio, se puede recuperar alrededor del 85-95% de los metales, aunque esto depende de la tecnología de reciclaje utilizada. Por último, si el proceso es lo suficientemente eficaz y la calidad de los materiales reciclados cumple con los requisitos de la industria fotovoltaica, las obleas pueden volver a transformarse en células.

Este último paso, la recuperación de los materiales valiosos de bajo peso, es el nuevo objetivo del sector de cara al futuro. Asimismo, es necesario abordar la mejora de la calidad de los materiales recuperados



La recuperación de los materiales valiosos de bajo peso, es el nuevo objetivo del sector de cara al futuro

para potenciar su uso secundario. En el siguiente recuadro, se expone el caso de una empresa francesa que ha desarrollado una solución al respecto. ROSI Solar es un buen ejemplo de cómo las nuevas tecnologías pueden llevar al negocio del reciclaje fotovoltaico al siguiente nivel.



Entrevista con ROSI Solar, empresa francesa de reciclaje fotovoltaico

Para conocer de primera mano el proceso de reciclaje, nos reunimos con uno de sus expertos, ROSI Solar. Esta *start-up* tecnológica francesa ha desarrollado un proceso que permite separar los materiales del interior de los paneles fotovoltaicos para reducir las pérdidas económicas y, en última instancia, disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero provocadas por la producción de materias primas para la industria. Su modelo de negocio incluye la participación en la explotación y el reciclaje, por lo que se asocian con otros recicladores para abarcar toda la cadena de reciclaje.

Como nos explicaron, cuando se recibe un módulo, el primer paso es retirar los cables de la caja de conexiones, el marco y el cristal. El marco y los cables están en buen estado y son fáciles de reutilizar. El cristal lo retira una de las empresas asociadas mediante un procesamiento térmico, lo que permite mantenerlo intacto. El vidrio es muy pesado, transparente y de una calidad muy alta, un producto ideal para un mercado de segunda mano ya existente de industrias con tales requisitos, como las de botellas y lana de vidrio. Un buen ejemplo práctico de esto es una empresa alemana llamada Reiling, un productor de vidrio que también recicla el vidrio de los módulos fotovoltaicos. En ocasiones, los paneles se reciben con el vidrio roto. En este caso, se puede reutilizar como material inerte, que se utiliza habitualmente en las carreteras como capa estabilizadora. En estos casos, no se recicla realmente, ya que se produce una pérdida importante de un material de calidad.

El siguiente paso consiste en desprender el polímero de los metales del interior del módulo. En los módulos de tamaño medio y grande, ROSI realiza este proceso mediante pirólisis, evaporando el polímero, lo que permite recuperar los metales en muy buen estado. A continuación, separan los metales: el cobre de las cintas, la célula de silicio y los finísimos pero valiosos dedos de plata que se encuentran sobre las células.

Como se ha mencionado anteriormente, el material base utilizado en los módulos fotovoltaicos es el silicio. Para producir obleas de silicio, se corta un lingote de silicio en láminas muy finas. Durante este proceso, más del 40% del silicio ultra puro se pierde como parte del lodo



conocido como *kerf*. ROSI ha desarrollado una solución para aprovechar este *kerf* separando completamente el silicio fino del líquido de corte. De este modo, el líquido puede reutilizarse en el proceso, y las partículas de silicio pueden recuperarse, reacondicionarse y volver a introducirse al inicio del proceso de producción.

Cuando se trata de reciclar el silicio de los módulos fotovoltaicos al final de su vida útil, el reto es mantener la tasa de pureza. Esto requiere trabajar con procesos muy eficientes y técnicas de separación extremadamente precisas; si el silicio se mezcla con el vidrio, resulta muy difícil separarlos, ya que tienen la misma densidad. Por este motivo, cuando en algunas plantas de reciclaje se tritura antes de separar, el valor (medioambiental y económico) del silicio se pierde por completo.

Las tecnologías de ROSI Solar permiten recuperar el silicio ultra puro de la célula, pero también los dedos de plata utilizados para recoger la corriente eléctrica generada por cada una. Además, no utilizan reacciones químicas agresivas; sus procesos se basan en mecanismos físicos, térmicos y de química suave. Paralelamente, también colaboran con otras empresas en Europa para evaluar nuevas técnicas para desprender los polímeros y el vidrio de las células.

En cuanto a la plata, en los módulos fotovoltaicos se presenta en forma de conductores. Existe un número muy limitado de empresas en el mundo capaces de fabricar esta combinación específica de aleación de plata con una calidad suficiente para conducir la corriente. Para ello, necesitan plata de gran pureza (99,99%), que posteriormente es tratada y mezclada con plomo y estaño para obtener la composición final, que se vende a los productores fotovoltaicos. Para reciclarla, es necesario separarla de la mezcla y purificarla de nuevo.

Además de las utilizadas por ROSI, existen otras soluciones tecnológicas probadas para el reciclaje de módulos fotovoltaicos. Esta tendencia creciente en todo el mundo es clave para la transición energética, y va de la mano de iniciativas normativas, empresariales y de otro tipo que incentivan el mercado. El año pasado, por ejemplo, basándose en las publicaciones, las entrevistas y las encuestas realizadas a las principales entidades de la cadena de valor, la organización sin ánimo de lucro alemana DUH (Deutsche Unwelthilfe) elaboró y publicó un libro blanco con opciones de mejora para el sector de la reutilización y el reciclaje. Otros colaboradores del sector solar y de la eliminación de residuos incluidos en este estudio fueron First Solar, ROSI Solar, Take-e-way y Veolia.

Módulos de capa fina

Los módulos de capa fina se procesan y reciclan mediante una combinación de tratamientos mecánicos y químicos. Como referencia, estos son los pasos del proceso implementado por la empresa First Solar, con una tasa de recuperación de masa de casi el 90% para el vidrio y aproximadamente el 95% para los materiales semiconductores:

1. **Rotura** de las uniones de laminación mediante la trituración y el aplastamiento en un molino de martillo en partículas de unos 5 mm. Paralelamente, aspiración del polvo con un filtro de aire de partículas.
2. **Grabado** de una capa de semiconductor con una mezcla química.
3. **Extracción** de líquidos de filtración con metales mediante precipitación.
4. **Extracting** filtration liquids with metals via precipitation.
5. **Purificación** del cadmio y el telurio por terceros, si se desea, para su reutilización en la industria solar.

Paneles de nueva generación

Aunque la mayoría de los módulos fotovoltaicos se rigen por normas similares en cuanto a la estructura y el tamaño de las células, en la actualidad existen 50.000 diseños diferentes en el mercado. Esto significa que los centros de reciclaje existentes, y los que se construyan en el futuro, deberán adaptar sus procesos a esta gran variedad, ya que los distintos diseños pueden utilizar materiales diferentes y tener espesores distintos. A pesar de ello, los paneles de nueva generación, como las células de heterounión o en tándem, se basan en la adición de capas de película fina a la parte superior del panel, lo que significa que las nuevas tecnologías continuarán basándose en el silicio. Esto permitirá que los procesos existentes puedan gestionar la mayor parte de los residuos fotovoltaicos generados.

1.3 Normativa de la gestión de residuos fotovoltaicos

El reciclaje de módulos fotovoltaicos es la solución para reducir el impacto medioambiental de la industria fotovoltaica y garantizar el suministro de materias primas. Se trata de una medida estratégica para la industria fotovoltaica y para Europa. Por esta razón, se ha establecido un marco normativo para fomentar la gestión y el reciclaje de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) asociados al módulo fotovoltaico al final de su vida útil. En este sentido, las directivas de la UE existentes han servido de referencia para otros países del mundo, como Australia o Corea del Sur, contribuyendo al proceso de elaboración de normativas de reciclaje y de protección medioambiental. Las políticas y tecnologías necesarias para el reciclaje de sistemas fotovoltaicos están siendo desarrolladas con gran celeridad. En España concretamente, el Real Decreto 110/2015 determina unos objetivos mínimos anuales de reciclaje de RAEE.

Las políticas y tecnologías necesarias para el reciclaje de sistemas fotovoltaicos están siendo desarrolladas con gran celeridad. En España concretamente, el Real Decreto 110/2015 determina unos objetivos mínimos anuales de reciclaje de RAEE

1.3.1 Introducción a la Directiva RAEE

En Europa, los módulos fotovoltaicos están sujetos a la Directiva de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE 2012/19/UE) desde su última revisión en 2012. Esto significa que el retorno y el reciclaje de los módulos fotovoltaicos ya es, de hecho, obligatorio en Europa. En la práctica, aunque está aumentando paulatinamente, aún se realiza en pequeñas cantidades. Otra directiva de la UE que se aplica en determinados casos a los residuos fotovoltaicos es la 2011/65/UE sobre restricciones a la utilización de determinadas sustancias peligrosas en aparatos eléctricos y electrónicos.

La Directiva RAEE es incorporada por cada Estado miembro a su legislación nacional; deben aplicarla cumpliendo la norma de responsabilidad del productor, que establece que la gestión de los módulos fotovoltaicos al final de su vida útil es responsabilidad legal de los productores. Se considera productor a toda persona física o jurídica que fabrique y venda equipos eléctricos y electrónicos, comercialice productos fabricados por terceros o realice adquisiciones comunitarias o importaciones de terceros países. Aplicado a los paneles fotovoltaicos, este «productor» puede ser cualquier empresa presente en la cadena: el fabricante de paneles, su distribuidor, el promotor de la planta, o incluso la empresa instaladora de autoconsumo. En el caso de Europa, existen algunos pequeños productores en países como España, Francia o Italia, pero en general la responsabilidad del reciclaje recae en los importadores. Según la directiva, los productores deben gestionar la cuota de mercado equivalente a los módulos que instalan en un año.

La única excepción en el mercado es el fabricante de capa fina First Solar, que gestiona sus propios módulos porque contienen sustancias específicas peligrosas, como el teluro de cadmio, no habituales en otras tecnologías fotovoltaicas. Por este motivo, la empresa ha desarrollado su

propio sistema de recogida y tecnologías de reciclaje, tal y como se ha detallado en el apartado anterior, ofreciendo así un servicio completo hasta el final de la vida útil de sus módulos.

La Directiva RAEE establece objetivos de recogida basados en los volúmenes comercializados. Incluso sobre el papel, los objetivos fijados son ambiciosos. El problema es que, en Europa, a día de hoy, la cantidad de módulos al final de su vida útil sigue siendo limitada en comparación con los volúmenes comercializados cada año. Esto significa que los residuos generados por los paneles fotovoltaicos seguirán siendo limitados durante algunos años. Además, existe una gran diferencia en el número de paneles instalados por cada país europeo.

1.3.2 Aplicación de la Directiva RAEE

Cada país ha desarrollado su propio sistema, aunque la forma más común es a través de esquemas de reciclaje, también conocidos como Sistemas Colectivos de Responsabilidad Ampliada del Productor (SCRAP), organismos legales que gestionan el final de la vida útil de los productos. Estas organizaciones sin ánimo de lucro asumen la carga legal de la actividad de recogida y reciclaje. A pesar del nombre, estos organismos no están compuestos por los propios productores. Es más, para financiar estas operaciones, las SCRAP cobran a cada productor una cuota de afiliación basada en los residuos generados. Pero no trabajan solas; en la práctica, las SCRAP se encargan de la recogida de los módulos, pero requieren de los socios técnicos adecuados para llevar a cabo el reciclaje. A veces las SCRAP se especializan en un tipo de residuo electrónico, otras veces se ocupan de diferentes flujos de residuos.

- En España, por ejemplo, hay actualmente pocas organizaciones de recogida de residuos fotovoltaicos y existe una cierta incertidumbre sobre quién es el responsable de cada función.

- En Francia, en cambio, existe una organización que monopoliza la recogida de todos los residuos fotovoltaicos, con tasas de recogida de hasta 5.000 toneladas al año.
- Otro ejemplo es Alemania, que ha establecido un mercado abierto con varios operadores y diferentes legislaciones en vigor, según el uso (doméstico o industrial) y la tecnología de los paneles (diseños más recientes o más antiguos).

1.3.3 El reto de realizar un seguimiento de los residuos fotovoltaicos

Aunque cada país europeo adopta un enfoque diferente para gestionar el mercado de la recogida y el reciclaje de los residuos fotovoltaicos, todos coinciden en que sigue existiendo una grave falta de transparencia en la monitorización de los módulos al final de su vida útil. Aunque el tratamiento de los residuos se considera parte del ciclo de vida de un módulo, se dispone de muy pocos inventarios del ciclo de vida (ICV) de los flujos de energía y materiales para los procesos de reciclaje industrial. ¿Cómo es posible que los países que fueron pioneros en materia de energía fotovoltaica en Europa sigan registrando tasas de recogida de residuos tan bajas? Esto pone de manifiesto otro problema legal clave en el sector, el relacionado con la exportación no regulada.

En Europa existen diversas iniciativas que estudian esta realidad en profundidad, atendiendo a todas las partes implicadas en la cadena para entender el motivo de la desaparición de los módulos al final de su vida útil. Algunos estudios revelan que se exportan a países en desarrollo como material de segunda mano. La creación de un mercado de segunda mano no supone un problema; lo que sí plantea dudas es que, en numerosas ocasiones, se envían a estos países módulos que ya no son funcionales o a los que les queda una vida útil muy corta. Dado que actualmente no

existe un marco normativo para monitorizar los módulos exportados, esta actividad se utiliza de forma habitual y errónea para evitar los gastos relacionados con el tratamiento de los residuos electrónicos en Europa, o simplemente para obtener un beneficio. No obstante, el mercado está experimentando una paulatina transformación, y se están redactando las normas adecuadas para controlar las transacciones fronterizas en Europa, imponiendo la obligación de proporcionar pruebas y referencias de identificación de los residuos como parte de una serie de controles rigurosos por parte de las autoridades aduaneras y portuarias.

Otros aspectos del marco normativo del reciclaje fotovoltaico con visos de evolucionar en un futuro próximo son los requisitos establecidos por la Directiva RAEE para la recuperación de fracciones de la masa de los módulos. En la actualidad, con el fin de cumplir con la legislación, las instalaciones de reciclaje de vidrio, metal o residuos electrónicos se han limitado a aumentar su capacidad de trabajo, pero apenas existen procesos de reciclaje especializados para los componentes menores de los paneles. El objetivo es optimizar las estructuras de recogida y reciclaje y cerrar los ciclos de los materiales con el fin de utilizarlos para una nueva producción de módulos. Para ello, están surgiendo otras iniciativas de la UE que promueven el diseño ecológico, las etiquetas energéticas y las ecoetiquetas con el objetivo de fomentar y promover un diseño fotovoltaico más sostenible.

1.3.4 Normativa en vigor en España

Algo similar ocurre en algunos Estados miembros, como España, donde disponer de un marco legal es el primer paso para incrementar la tasa de recogida y lograr un mayor aprovechamiento de los módulos fotovoltaicos obsoletos. En España, la directiva fue incorporada a la legislación española mediante el Real Decreto 110/2015, que inicialmente incluía



los paneles fotovoltaicos en la categoría de aparatos electrónicos, pero desde 2019 los clasifica aparte. El Real Decreto define los requisitos mínimos de las instalaciones de reciclaje de residuos fotovoltaicos, así como el procedimiento técnico para su gestión.

Según el RD 110/2015, los productores españoles deben cumplir con los siguientes requisitos:

- Registro oficial - en el Registro Integrado Industrial de Productores de Aparatos Eléctricos y Electrónicos y de Pilas y Acumuladores gestionado por el Ministerio de Industria.
- Declaración de productos - con periodicidad trimestral, sobre las cantidades de productos comercializados en el mercado nacional.
- Gestión del final de la vida útil - adoptar las medidas y los costes de financiación necesarios para que los paneles sean recogidos al final de su vida útil y reciban una gestión medioambiental adecuada.

Existe un importante reto relacionado con este último punto: determinadas empresas de producción fotovoltaica han ido desapareciendo del mercado antes de que sus instalaciones fotovoltaicas hayan llegado al final de su vida útil. Esto significa que cuando esas plantas fotovoltaicas lleguen al final de su vida útil, no existirá una entidad legal que se haga responsable

de la recogida. Aunque esta situación se sigue produciendo, hoy en día el mercado es mucho más maduro y estructurado, y la continuidad de los productores fotovoltaicos ya no es tan problemática.

En cuanto a las prácticas de recogida, en la actualidad, el sector está trabajando para ofrecer un proceso intuitivo y opciones de retorno en todo el país. De este modo, los productores/importadores estarían obligados a adherirse a un sistema de recogida o a crear opciones de retorno adecuadas con suficientes puntos de recogida. Asimismo, los expertos coinciden en que los objetivos mínimos de reciclaje propuestos en el Real Decreto español sobre Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE) deberían revisarse para ofrecer una orientación a largo plazo.

Los objetivos mínimos de reciclaje propuestos en el Real Decreto español sobre Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE) deberían revisarse para ofrecer una orientación a largo plazo

2

Energía eólica

2.1 Introducción a la gestión al final de la vida útil del mercado de la energía eólica,

- 2.1.1 Materiales y composición de los aerogeneradores
- 2.1.2 Análisis de la implantación prevista de la energía eólica
- 2.1.3 Residuos previstos en el sector de la energía eólica
- 2.1.4 El papel de la reutilización en el sector de la energía eólica

2.2 Cómo reciclar los componentes de los aerogeneradores

2.3 Marco legal para lograr la circularidad en el sector de la energía eólica

- 2.3.1 Normativa en vigor en los diferentes mercados de la UE
- 2.3.2 Legislación relativa a los materiales

2.1 Introducción a la gestión al final de la vida útil del mercado de la energía eólica

En lo que respecta al sector de la energía eólica, al igual que ocurre con la industria fotovoltaica, la tracción del mercado y las previsiones de la industria son ambiciosas. Algunos parques eólicos se acercan al final de su vida útil y deben ser evaluados para tomar una decisión fundamentada sobre la conveniencia de prolongar su vida útil o desmantelarlos. Esta decisión está influenciada por diferentes factores.

En la mayoría de los casos, la prolongación de la vida útil es la opción preferida, ya que es el modo más sencillo de maximizar el rendimiento de la inversión. Sin embargo, esta alternativa requiere que el propietario evalúe el estado de su activo en términos de vida útil posible. Además, se requiere un suministro fiable de piezas de repuesto. Esto puede resultar problemático, ya que los fabricantes de equipos originales pueden carecer de información sobre el diseño original de determinados aerogeneradores. Algunos modelos fueron diseñados y fabricados por empresas que han sido adquiridas o absorbidas por otras o desaparecieron hace tiempo.

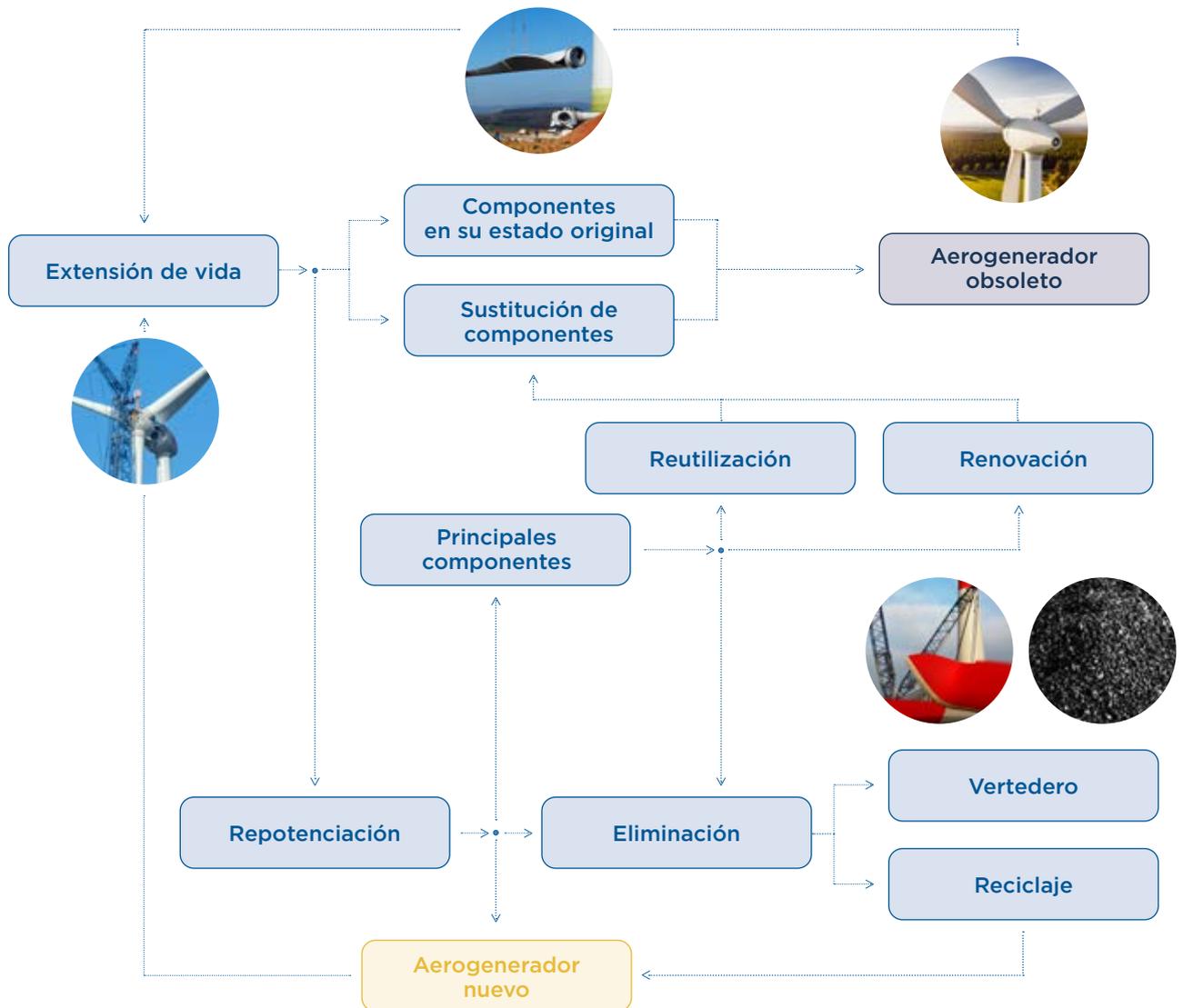
Cuando la prolongación de la vida útil es inviable, se requiere una estrategia de repotenciación, en la que se desmontan los aerogeneradores y se sustituyen por otros más modernos, además de realizar pequeñas mejoras en la infraestructura de conexión a la red. Varios factores influirían en la decisión de optar por esta solución: la normativa, por ejemplo, o la posibilidad de reutilizar gran parte de la inversión anterior en el resto de la planta.

En lo que respecta al sector de la energía eólica, al igual que ocurre con la industria fotovoltaica, la tracción del mercado y las previsiones de la industria son ambiciosas

Por último, si ninguna de las opciones anteriores se considera adecuada por motivos económicos o normativos, el propietario del activo puede decidir interrumpir la actividad y desmantelar completamente el parque eólico. El proceso de toma de decisiones se detalla en el gráfico 10.



Gráfico 10.
Diagrama de flujo de la vida útil de los aerogeneradores y sus componentes.



Si se comparan los activos desmantelados con los activos de vida útil prolongada, existe una posibilidad clara e interesante de reutilización y reacondicionamiento utilizando los componentes principales. En estos casos es de gran interés la reutilización de engranajes, inversores, generadores, palas, actuadores, trenes de potencia y controles.

Sin embargo, este planteamiento no podrá utilizarse en los modelos de aerogeneradores menos comunes en el mercado, ya que es poco probable que se disponga de un volumen suficiente de componentes reutilizados o reacondicionados para prolongar su vida útil.

2.1.1 Materiales y composición de los aerogeneradores

Aunque los materiales utilizados y las potencias de los aerogeneradores han evolucionado en las últimas décadas, el consumo medio de materiales por MW se ha mantenido estable. Esto puede ser útil para definir las cantidades utilizadas o necesarias para su uso, y establecer los requisitos de gestión de tales desechos en la actualidad y en el futuro.

Como se muestra en la Tabla 4, la mayor parte de las diferencias se derivan de la introducción de los aerogeneradores de

imanes permanentes y de la intensidad de uso de los materiales de tierras raras.

Los materiales estándar y no específicos representan más del 90% del peso total de un aerogenerador, incluida su cimentación. Esta proporción es aún mayor si consideramos los parques eólicos marinos. Esto es de especial importancia cuando se habla de reciclabilidad y recuperación de materias primas para las que ya existen tecnologías, modelos de negocio o mecanismos de apoyo.

Sin embargo, el 10% restante presenta problemas de viabilidad económica y de disponibilidad de tecnologías. Este aspecto se analizará más adelante.

Tabla 3.
Toneladas métricas de material por GW (ref: *Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system, JRC - European Commission, Carrara, S., Alves Dias, P., Plazzotta, B., Pavel, C., 2020*)

Material	GI-ADGB	GS-EEAD	GS-IPGB	GS-IPAD
Hormigón	355.000	369.000	413.000	243.000
Acero	113.000	132.000	107.000	119.500
Hierro (fundido) (Fe)	18.000	20.100	20.800	20.100
GFC / CFC	7.700	8.100	8.400	8.100
Zinc (Zn)	5.500	5.500	5.500	5.500
Polímeros	4.600	4.600	4.600	4.600
Cobre (Cu)	1.400	5.000	950	3.000
Aluminio (Al)	1.400	700	1.600	500
Manganeso (Mn)	780	790	800	790
Cromo (Cr)	470	525	580	525
Níquel (Ni)	430	340	440	240
Molibdeno (Mo)	99	109	119	109
Neodimio (Nd)	12	28	51	180
Disproso (Dy)	2	6	6	17
Praseodimio (Pr)	0	9	4	35
Terbio (Tb)	0	1	1	7
Boro(B)	0	0	1	6
Total (solo aerogenerador)	153.393	177.808	150.852	163.209
Total (todo)	508.393	546.808	563.852	406.209

(GI-ADGB = Generador de Inducción de Alimentación Directa Gearbox, GS-EEAD = Generador Síncrono de Excitación Externa de Accionamiento Directo, GS-IPGB = Generador Síncrono de Imán Permanente Gearbox, GS-IPAD = Generador Síncrono de Imán Permanente de Accionamiento Directo)

En comparación con el mercado fotovoltaico, en el de la energía eólica la mayoría de materiales tienen menos valor que el propio componente, por lo que tiene más sentido repararlos y renovarlos para utilizarlos como repuestos de otras turbinas. Sólo se planteará la recuperación

de los materiales cuando no sea posible prolongar la vida útil del componente. En ese caso, el valor de los materiales puede alcanzar a cubrir los costes de los procesos de eliminación. La única excepción a considerar son las tierras raras con un valor intrínseco muy alto.

Tabla 4.
Necesidades de materiales frente a la capacidad de producción y los precios (todo ello referido a toneladas métricas) para una retirada anual de 10 GW.

Material	Demanda	vs. Demanda mundial	Producción		Precio \$
			Global	Europa	
Hormigón	10.350.000	0,10%	10.058.000.000	610.400.000	50
Acero	3.536.250	0,18%	1.911.900.000	11.500.000	736
Hierro (fundido) (Fe)	592.500	0,43%	139.000.000	9.100.000	1.481
Compuestos de vidrio/ carbono	242.250	3,79%	6.400.000	950.000	1.000
Zinc (Zn)	165.000	1,24%	13.300.000	88.926	3.639
Polímeros	138.000	0,23%	59.000.000	6.726.000	N/A
Cobre (Cu)	77.625	0,46%	16.890.000	135.321	9.919
Aluminio (Al)	31.500	0,05%	65.296.000	262.000	3.546
Manganeso (Mn)	23.700	0,13%	18.000.000	0	4
Cromo (Cr)	15.750	0,04%	44.000.000	0	7.400
Níquel (Ni)	10.875	0,40%	2.700.000	285.000	2.4695
Molibdeno (Mo)	3.270	1,31%	250.000	100	12
Tierras raras (Nd,Dy,Pr,Tb)	2.693	1,12%	240.000	0	50.000
Boro(B)	53	0,00%	4.310.000	0	290

Por otro parte, un examen más detallado de la capacidad de producción de estos materiales, así como de la facilidad de acceso a los mismos, puede proporcionar

una información relevante en cuanto a la tracción del mercado en la recuperación o no recuperación de los materiales.



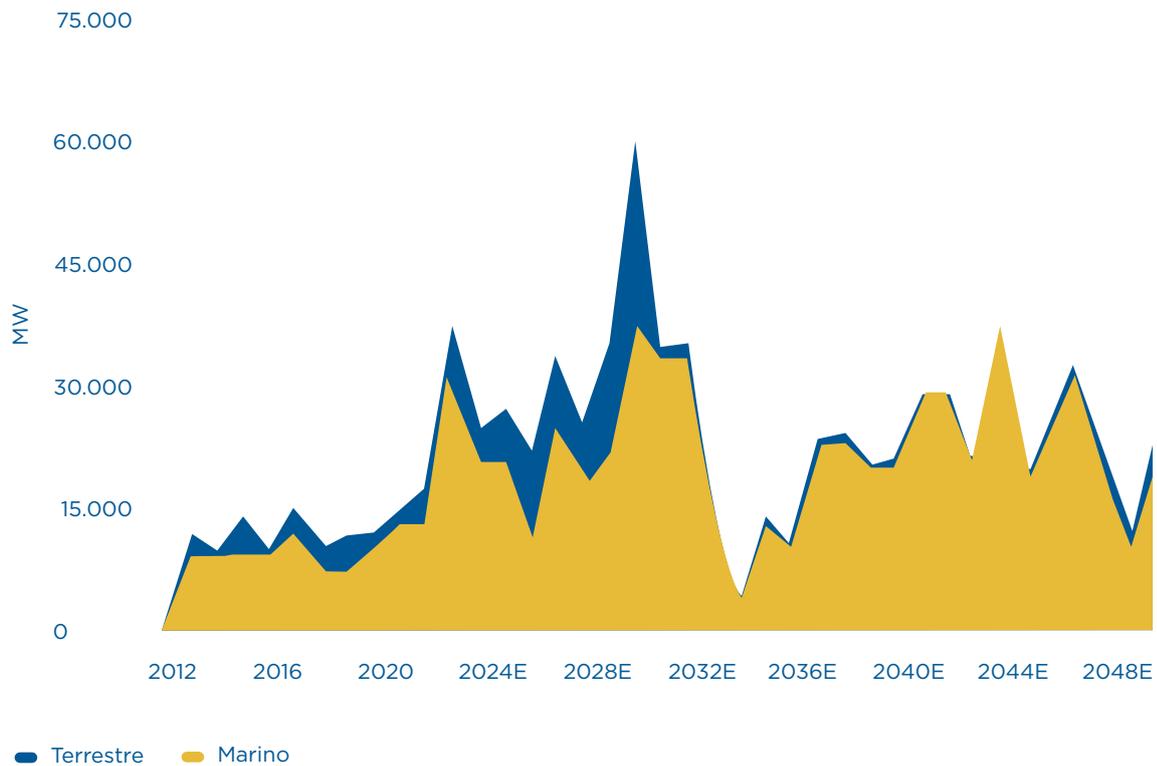
2.1.2 Análisis de la implantación prevista de la energía eólica

Como uno de los pilares de la estrategia de descarbonización de la Unión Europea, la industria de la energía eólica no sólo proporcionará un elevado suministro de energía en los próximos años, también beneficiará a otros aspectos como la creación de riqueza y empleo. Para ofrecer una idea precisa de las perspectivas de

la energía eólica europea en los próximos años, debemos considerar tanto las retiradas de capacidad del mercado como la instalación de capacidad anual.

Como se aprecia en los gráficos 11 y 12, se prevé una media anual de 30 GW de nuevas instalaciones, mientras que las retiradas alcanzarán los 10 GW anuales. Idealmente, y siempre que sea factible desde el punto de vista técnico y económico, el uso circular de materiales reciclados podría suministrar un tercio de los materiales necesarios.

Gráfico 11.
Aumento de la capacidad anual.

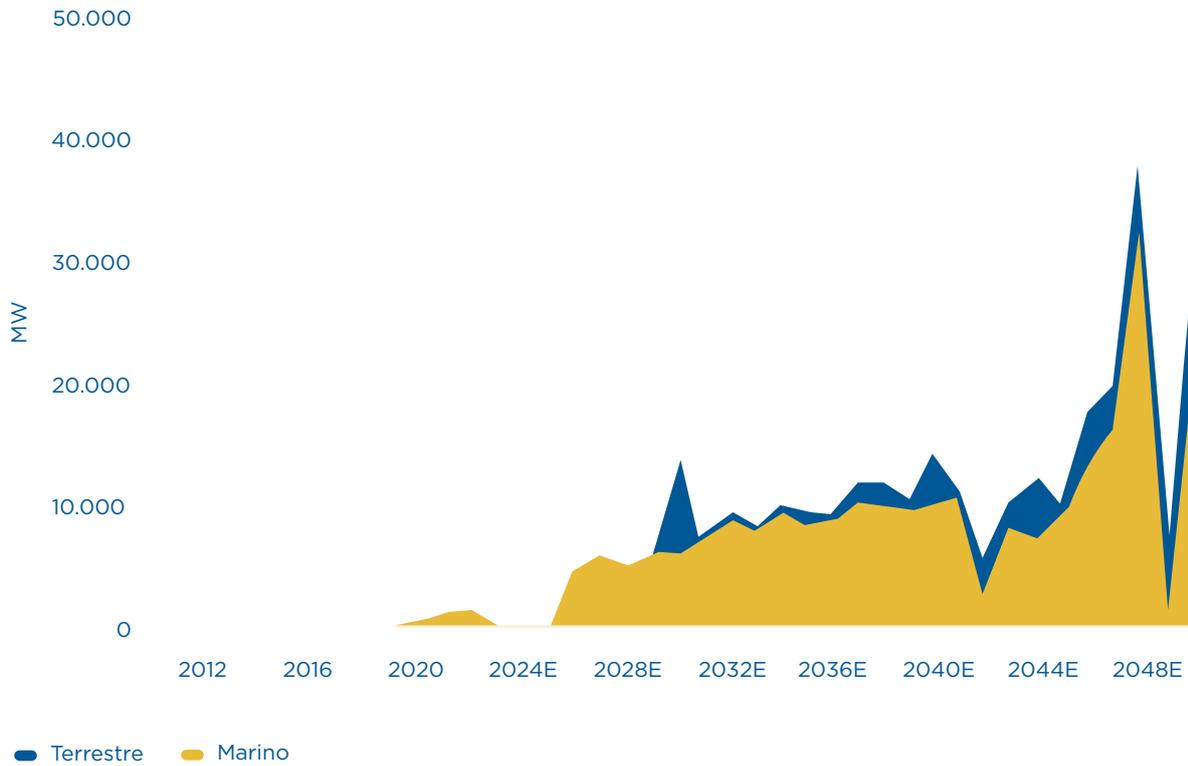


Se espera que este desmantelamiento abra nuevas oportunidades de negocio, además de presentar algunos retos.



Media anual prevista de GW de nuevas instalaciones, mientras que las retiradas alcanzarán los 10 GW anuales

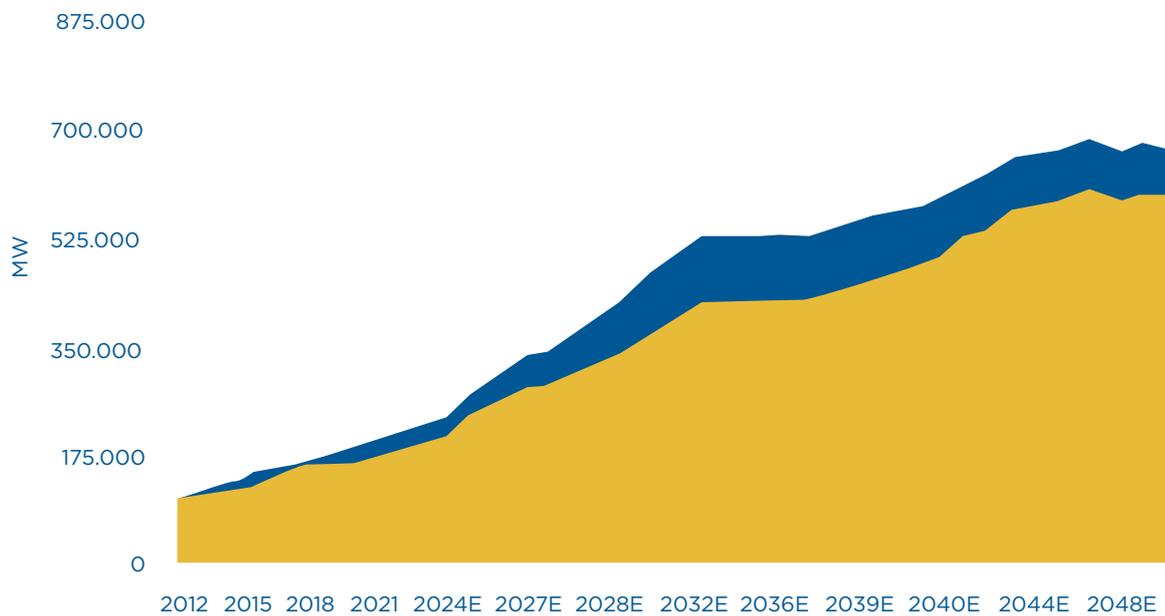
Gráfico 12.
Retirada de capacidad anual.



Idealmente, y siempre que sea factible desde el punto de vista técnico y económico, el uso circular de materiales reciclados podría suministrar un tercio de los materiales necesarios

Como consecuencia de esto, considerando una vida media de las centrales eléctricas de 25 años, el gráfico 13 muestra un escenario conservador de las previsiones de evolución del mercado de la energía eólica.

Grafico 13.
Perspectivas para el mercado europeo 2012-2050.



Antes de calcular los residuos producidos en el mercado de la energía eólica, analicemos la situación actual en términos de aumento de la implantación futura frente a la disponibilidad de materiales. En este sentido, como veremos en las próximas páginas, la industria eólica es bastante eficaz en la reutilización de componentes, por lo que estos

materiales vuelven a incorporarse a la industria. Aun así, **sólo la implantación de aerogeneradores prevista por la UE requerirá en 2050 la mayor parte del neodimio, praseodimio, disprosio y terbio actualmente disponibles.** En consecuencia, se prevé una fuerte demanda de tierras raras.

2.1.3 Residuos previstos en el sector de la energía eólica

Varios de los componentes de los 10 GW de parques eólicos desmantelados serán:

- Reutilizados: Utilizados directamente como piezas de recambio (prolongación de la vida útil a nivel de componente) o reacondicionados para ser vendidos como piezas de recambio de alta calidad (como ocurre en la industria del automóvil).
- Usos alternativos para otros mercados.
- Reciclados para recuperar materias primas (planteamiento similar al de la minería) para ser reutilizados en el sector de la energía eólica (uso circular) o mediante su uso en otros sectores.

Como hipótesis de trabajo, se considera que el 65% de los componentes recuperados de un parque eólico desmantelado se volverán a utilizar como piezas de recambio en aquellos parques eólicos que alarguen su vida operativa. Este mercado, aunque limitado en el tiempo, podría ser muy atractivo, ya que la mayoría de los aerogeneradores o componentes principales ya no cuentan con el apoyo de los fabricantes de equipos originales, lo que hace muy difícil encontrar piezas de repuesto de alta calidad.

El 35% restante tendrá que ser desechado. Se recurrirá a tecnologías de coste razonable que permitan recuperar los materiales de mayor valor. Para los elementos que no puedan ser procesados, se requerirán métodos para transformarlos en inertes y de bajo volumen, así como mecanismos de apoyo.

2.1.4 El papel de la reutilización en el sector de la energía eólica

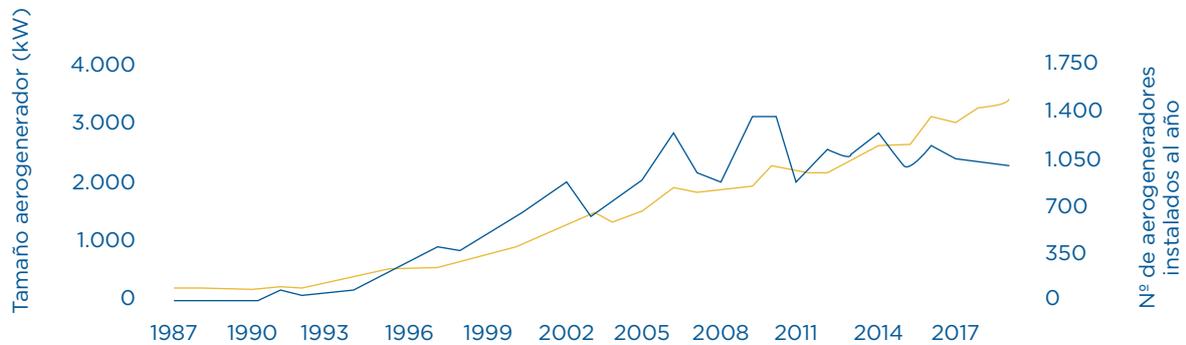
En la actualidad, existen 108.165 aerogeneradores en funcionamiento en Europa, de los cuales 8.325 no han podido ser identificados. Los 99.840 restantes han sido producidos por 103 fabricantes de equipos originales diferentes. De estos, menos de 10 seguían operativos en 2020. La mayoría de los fabricantes de equipos originales han desaparecido, ya sea por procesos de absorción, adquisición o cierre.

Tabla 5.
Aerogeneradores operativos instalados en Europa (2021).

Fabricante	Cuota	Nº unidades
SGRE	29,26%	31.649
Vestas	27,89%	30.167
Enercon	18,09%	19.567
No identificados	7,70%	8.325
Nordex	7,05%	7.626
GE Energy	6,19%	6.695
Varios - No activos	2,60%	2.812
Varios - Activos	1,22%	1.320

La tabla 5 ofrece un resumen de los aerogeneradores instalados en Europa que continúan operativos según los datos de 2021. Como se aprecia, cinco fabricantes (SGRE, VESTAS, ENERCON, NORDEX y GE ENERGY) acaparan cerca del 90% de las unidades instaladas. Es necesario evaluar estos datos con prudencia, dado que la adquisición o absorción de empresas puede provocar un mantenimiento insuficiente por parte de los nuevos propietarios de los aerogeneradores heredados. No obstante, puede concluirse que existe un volumen suficiente para posibilitar un modelo de negocio sostenible de reutilización y reacondicionamiento en el rango de 750 kW a 2,5 MW de potencia nominal (el gráfico 14 muestra la evolución del tamaño de los aerogeneradores de VESTAS en los últimos 25 años).

Gráfico 14.
Evolución en el número de unidades instaladas por VESTAS y su potencia nominal.



Esto ofrece una oportunidad a los proveedores de primer nivel de los principales fabricantes de equipos originales. Su experiencia en la fabricación de componentes clave puede permitirles diversificar su actual modelo de negocio e incluir el mantenimiento o el suministro de piezas de recambio. Dependiendo del tipo de cliente final (propietario de una planta de energía eólica, productor independiente de energía o fabricante de equipos originales), esto puede requerir una calidad específica, la definición de la oferta de servicios o canales de distribución comercial.

Otra cuestión es la recogida de componentes, que puede diferir si se trata de un parque eólico que debe ser desmantelado o de la sustitución de un componente defectuoso. La logística ligada al tamaño de algunos componentes será un factor relevante.



Esto ofrece una oportunidad a los proveedores de primer nivel de los principales fabricantes de equipos originales. Su experiencia en la fabricación de componentes clave puede permitirles diversificar su actual modelo de negocio e incluir el mantenimiento o el suministro de piezas de recambio

2.2 Cómo reciclar los componentes de los aerogeneradores

En lo que respecta a la industria de la energía eólica, son viables diferentes tecnologías de reciclaje en función de los materiales incluidos en cada componente. En este apartado nos centraremos en analizar la variedad de materiales que componen un aerogenerador y en el proceso de recuperación que se utiliza para cada uno de ellos.

Tabla 6.
Composición de los materiales de los principales componentes.

Material vs. Componente	Cimentación		Góndola	Buje del rotor	Palas	Tren de potencia	Engranajes	Generador	Inversor	Cableado
		Torre								
Hormigón	○									
Acero	○	○			○		○	○	○	
Polímeros			○	○	○			○	○	
Compuestos de vidrio/carbono			○	○						
Aluminio (Al)								○	○	○
Cromo (Cr)										
Cobre (Cu)					○			○	○	○
Hierro (fundido) (Fe)			○	○		○				
Zinc (Zn)								○		
Níquel (Ni)	○	○					○	○		
Manganeso (Mn)										
Molibdeno (Mo)	○	○					○			
Boro(B)										
Tierras raras (Nd, Dy, Pr, Tb)								○		

De los materiales enumerados en la tabla 6, las aleaciones se envían directamente a los centros de transferencia de residuos donde se realiza un proceso específico de

reciclaje. Estos materiales son: zinc, níquel, manganeso, molibdeno, boro y cromo.

El resto de los materiales sigue un proceso de reciclaje diferente, tal como se detalla a continuación:

Hormigón → No existe un método sencillo de reciclaje de hormigón. El material se tritura para separar las barras de acero utilizadas como refuerzo, y el material restante se tritura de nuevo para producir un material de tamaño homogéneo que se utilizará como relleno o para su uso en el sector de la construcción. El valor del residuo es limitado, por lo que no compensa el coste del proceso.

Acero → Es posible reciclar el acero, y el valor del material recuperado cubre los costes iniciales debido al valor de la chatarra de acero. El acero es el material más reciclado del planeta. Tras su reciclaje mantiene sus principales propiedades de resistencia, ductilidad y conformabilidad.

Dado que el acero es una aleación de hierro, también contiene otros elementos que se añaden para lograr la calidad requerida para el uso final del acero. Por ello, es importante clasificar las aleaciones similares conjuntamente para conocer el material final y obtener un resultado rentable.

Si las aleaciones no se clasifican correctamente, deben añadirse nuevas fases al proceso de reciclaje para separar esos elementos de aleación u otros metales de forma rentable. Los más difíciles de extraer de la chatarra son el cobre, el estaño, el níquel y el molibdeno. Si no se extraen, su concentración aumenta con cada ciclo de reciclaje.

El proceso de reciclaje del acero es sencillo. Existe un primer proceso de clasificación, en el que se separa de otros materiales y se tritura en grandes bloques. Estos bloques se procesan en las acerías, donde se mezclan con otra chatarra de acero, se funden y, finalmente, se produce acero nuevo.

Fibra de vidrio / fibra de carbono → Hoy en día, el vertido o la incineración son las principales soluciones para eliminar los compuestos de fibra de vidrio o de carbono.

Las fibras de vidrio se consideran incombustibles, por lo que la combustión de los materiales compuestos con fines térmicos viene determinada principalmente por la proporción de polímero que contengan. Dinamarca tiene experiencia en la mezcla de residuos de materiales compuestos con residuos sólidos municipales para mejorar el proceso de incineración. El principal problema del proceso de incineración son las cenizas, ya que los compuestos contienen una gran cantidad de material no orgánico. Estas cenizas pueden ser un contaminante potencial y, o bien se depositan en vertederos, o bien se reciclan como material de construcción sustitutivo. El bajo poder calorífico de los materiales compuestos no es útil para el planteamiento de la incineración.

Otra posibilidad es quemar los materiales compuestos reforzados con fibras en hornos de cemento para la producción de cemento. Según algunos estudios, alrededor de un 10% del aporte de combustible podría sustituirse por hormigón reforzado con fibra de vidrio y las cenizas podrían incorporarse al cemento para mejorar sus propiedades.

El vertido sigue siendo la solución más común porque los materiales compuestos son intrínsecamente inertes y no tóxicos, por lo que se clasifican como no peligrosos. Sin embargo, factores como el impacto visual y la larga vida de esos residuos ejercen presión sobre la industria para encontrar soluciones de reciclaje viables.

Las principales alternativas en fase de investigación y desarrollo son:

- Procesos mecánicos: Triturar los materiales y utilizarlos como relleno en aplicaciones de bajo valor, especialmente en el sector de la construcción, donde pueden utilizarse como material aislante.
- Procesos térmicos: La calidad del proceso depende del nivel de resina presente en las fibras. El principal problema en la reutilización de las fibras tras haber sido extraídas es la no homogeneidad en la longitud de la fibra que requiere un

No existe un método sencillo de reciclaje de hormigón. El material se tritura para separar las barras de acero utilizadas como refuerzo, y el material restante se tritura de nuevo para producir un material de tamaño homogéneo que se utilizará como relleno o para su uso en el sector de la construcción



proceso posterior para hacer viable su uso. requires a further process to make its use viable.

- Gasificación (lecho fluidizado): El proceso utiliza aire caliente sobre un lecho fluidizado para gasificar la resina y liberar las fibras. Los productos potenciales son las fibras, el material de relleno y los gases de combustión.
- Pirólisis: Oxidación térmica de la resina para liberar las fibras. Es necesario controlar la temperatura para evitar que las fibras se quemen o se oxiden. Los productos potenciales son fibras, material de relleno y carbón. Además, se pueden extraer o incluso reutilizar productos de hidrocarburos para facilitar el proceso térmico.

- Procesos químicos:
- Solvólisis: Se utiliza un reactor para disolver los componentes orgánicos. Los productos potenciales son fibras y compuestos minerales.
- Procesos de fragmentación::
 - Pulso de alto voltaje: Fractura la interfaz entre la matriz y las fibras en un proceso intenso utilizando un pulso de alto voltaje en un corto período de tiempo.

La pirólisis es una de las opciones con más futuro debido a su mayor desarrollo y a su flexibilidad de uso para materiales de fibra de vidrio y de carbono. Aun así, queda por resolver la cuestión del tratamiento posterior de las fibras para aumentar el valor de los residuos.

Aluminio → La industria del reciclaje de aluminio está a la cabeza de otras industrias de reciclaje. Los esfuerzos a largo plazo para promover el reciclaje y la reutilización del aluminio han dado sus frutos, y no existe otro material que retorne con más frecuencia a las plantas de reciclaje que el aluminio.

El proceso actual de reciclaje del aluminio es rápido y eficaz. Esto es de vital importancia, ya que en la actualidad se dispone de una gran cantidad de este metal sumamente práctico para su reprocesamiento y reutilización.

1. Clasificación
2. Trituración
3. Limpieza
4. Fundición
5. Extracción de productos derivados
6. Creación de la aleación
7. Compuesto

Cobre → El cobre es un material fácilmente reciclable. El material recuperado puede tener un valor de hasta el 90% de su coste original.

Dependiendo de la pureza del cobre, existen varias alternativas que van desde la fusión del material hasta la disolución química seguida de una electrodeposición.

Hierro fundido → El hierro fundido es totalmente reciclable. Puede recuperarse fácilmente y procesarse para su reutilización sin limitaciones. El proceso es muy similar al del acero.

Al ser magnético, el hierro puede separarse rápidamente de otros metales reciclables en una instalación de reciclaje de metales mediante potentes cintas magnéticas. Posteriormente, unas trituradoras con tambores magnéticos giratorios extraen el hierro y el acero de una mezcla de metales y otros materiales. A esto le sigue otra fase de separación que puede implicar corrientes eléctricas, flujos de aire a alta presión y sistemas de flotación de líquidos. Para los componentes de mayor tamaño, el siguiente paso del proceso es el cizallamiento. Esto implica maquinaria hidráulica u otras técnicas de corte. El último paso es el enfardado, la compactación de los productos de hierro en grandes bloques que facilitan considerablemente su manipulación y transporte.

Tierras raras → Incluidas en su mayoría en los imanes permanentes de los generadores, las tierras raras tienen una importancia estratégica y despiertan un gran interés. Las principales dificultades para extraer las tierras raras de los imanes permanentes son:

- Dificultad para descomponer los compuestos químicos.
- Bajas concentraciones de tierras raras.
- Procesos costosos comparados con el valor de los elementos recuperados.

Los diferentes métodos de separación y reciclaje en desarrollo son:

- Procesos hidrometalúrgicos.
- Procesos pirometalúrgicos.
- Extracción en fase gaseosa mediante procesos corrosivos con cloro.
- Reducción directa con hidrógeno.

2.3 Marco legal para lograr la circularidad en el sector de la energía eólica

Como parte de los esfuerzos orientados a la descarbonización y en relación con el Pacto Verde Europeo, en 2020 la Comisión Europea publicó el nuevo plan de acción para la economía circular (PAEC). Aunque el sector de la energía eólica no está considerado una cadena de valor de productos clave, algunos principios establecidos para la electrónica y las TIC, la construcción y los edificios sí pueden ser de aplicación.

La Comisión Europea tiene previsto establecer una iniciativa legislativa de política de productos sostenibles que ampliará la directiva de diseño ecológico.

Asimismo, la circularidad en el proceso de producción se alineará con la estrategia industrial europea con el fin de alcanzar, entre

otros, los siguientes objetivos fundamentales:

- Evaluar las opciones para continuar promoviendo la circularidad en los procesos industriales
- Promover el uso de tecnologías digitales para el seguimiento, la localización y el trazado de mapas de los recursos.
- Promover la adopción de tecnologías verdes a través de un sistema efectivo de control mediante el registro del sistema de verificación de tecnologías medioambientales de la UE como marca de certificación de la UE.

2.3.1 Normativa en vigor en los diferentes mercados de la UE

El desmantelamiento de los aerogeneradores se rige por la legislación nacional de cada Estado miembro. No existe ninguna directiva europea que armonice este proceso. Las principales normas de aplicación por país son:

Tabla 7.
Principales normas de aplicación nacional al desmantelamiento de aerogeneradores en Europa.

País	Normativa
Dinamarca	Por lo general, cada municipio establece las condiciones para el desmantelamiento en el edificio y expide inicialmente un permiso de explotación.
Francia	<ul style="list-style-type: none"> • Regulado por el «Decreto de 26 de agosto de 2011 relativo a la concesión y a la constitución de garantías financieras para las instalaciones de producción de electricidad que utilizan la energía mecánica del viento» y el «Código de Medio Ambiente» • Revisado por el Decreto del 22 de junio de 2020. • Se prevén disposiciones específicas en el artículo R 515-107 del Código Medioambiental.

Continúa >

País	Normativa
Alemania	<ul style="list-style-type: none"> • Regulado por la Ley de Fuentes Renovables de Energía de 2017. • Disposiciones en el Código de la Edificación.
Italia	Regulado por el Decreto Ministerial de 10 de septiembre de 2010 titulado «Directrices para la autorización de instalaciones alimentadas por fuentes renovables».
Países Bajos	Regulado en el Decreto de la Edificación de 2012.
España	<ul style="list-style-type: none"> • No existe un marco legal específico. • Los requisitos están incluidos en la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) de cada proyecto.

2.3.2 Legislación relativa a los materiales

También existen, paralelamente, legislaciones específicas para los materiales. Detallamos a continuación las normas en vigor que regulan el hormigón, los metales, los materiales compuestos y las tierras raras.

Hormigón

- Norma europea EN 197-1.
- No existe una legislación específica a nivel de los Estados miembros relativa a las cimentaciones de los aerogeneradores o a los residuos de hormigón. Según la Directiva Marco de Residuos de la UE (2008/98/CE), a partir de 2020 al menos el 70% del peso del hormigón no peligroso deberá reutilizarse o reciclarse.
- En España el Real Decreto 105/2008 de 1 de febrero regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición.

Metales

- El artículo 10(2) de la Directiva Marco de Residuos (2008/98/EC) determina la obligatoriedad de la recogida selectiva de papel, metal, plásticos y vidrio a partir de 2015.
- El artículo 11 de la Directiva Marco de Residuos 2009/98 establece que «los Estados miembros tomarán medidas para

fomentar un reciclado de alta calidad y, a este fin, establecerán una recogida separada de residuos, cuando sea técnica, económica y medioambientalmente factible y adecuada para cumplir los criterios de calidad necesarios en los sectores de reciclado correspondientes».

- España transpuso la Directiva en la Ley 22/2011 de Residuos y Suelos Contaminados. Las comunidades autónomas también disponen de su propia normativa.

Compuestos

- De acuerdo con la clasificación europea de residuos, los residuos de palas de materiales compuestos se categorizan generalmente como residuos plásticos de la construcción y la demolición con el código 17 02 03.
- La Estrategia Europea para los Plásticos en una Economía Circular subraya que la baja tasa de reutilización y reciclaje (menos del 30%) de los plásticos al final de su vida útil es un reto clave que es necesario abordar. Hasta ahora, los esfuerzos se han centrado en los plásticos de un solo uso, los microplásticos, los oxoplásticos y los envases de plástico, y no en los residuos compuestos.
- Solo cuatro países europeos (Alemania, Austria, Países Bajos y Finlandia) han prohibido el envío de las palas a los vertederos.
- El sector ha solicitado que se prohíba el vertido en toda Europa a partir de 2025.



- A partir de julio de 2022, los propietarios de parques eólicos en Francia están obligados a reciclar el 40% del peso de las palas.

Tierras raras

- De acuerdo con la Directiva Marco de Residuos de la UE (2008/98/CE), los elementos de las tierras raras están catalogados como no peligrosos. Hasta la fecha, no existe una legislación europea o nacional específica relacionada con las tierras raras.

Cables eléctricos

- La Directiva RAEE 2012/19/UE establece en su artículo 2, apartado 4(c), que «la presente Directiva no se aplicará a los siguientes AEE: instalaciones fijas de gran envergadura, excepto los aparatos que no estén específicamente diseñados e instalados como parte de dichas instalaciones».

- En virtud del anexo VII de la Directiva sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) de la UE (2012/19/UE), los cables eléctricos exteriores deben extraerse de cualquier RAEE recogido por separado y eliminarse o recuperarse de conformidad con la Directiva marco sobre residuos (2008/98/CE).

La Estrategia Europea para los Plásticos en una Economía Circular subraya que la baja tasa de reutilización y reciclaje (menos del 30%) de los plásticos al final de su vida útil es un reto clave

3

Baterías

3.1 Introducción a la gestión al final de la vida útil de las baterías

- 3.1.1 Materiales y composición de las baterías
- 3.1.2 Previsiones de demanda de baterías para el mercado de la movilidad
- 3.1.3 Residuos previstos en el sector de las baterías
- 3.1.4 El mercado español y las iniciativas existentes para el reciclaje de baterías

3.2 Procesos de reciclaje de baterías

- 3.2.1 Pirometalurgia
- 3.2.2 Hidrometalurgia
- 3.2.3 Combinación de pirometalurgia e hidrometalurgia
- 3.2.4 Reciclaje de futuros compuestos químicos

3.3 Presente y futuro del marco regulador de las baterías

- 3.3.1 Normativa actual
- 3.3.2 El futuro inmediato: la nueva normativa de las baterías

3.1 Introducción a la gestión del final de la vida útil de las baterías

Este apartado, dedicado al mercado del reciclaje de baterías, debe comenzar enfatizando su importancia para el éxito de la transición energética verde. Las baterías son clave para dos de sus ejes principales: la electrificación de la movilidad y el aumento de las energías renovables en el mix energético. La creciente demanda de baterías prevista para un futuro próximo exige un aumento de materias primas que la minería no puede proporcionar, especialmente en Europa, con sus largos periodos de obtención de permisos (los proyectos mineros requieren entre 5 y 10 años para desarrollarse hasta el inicio de las operaciones). Así pues, junto a las necesidades generales que el reciclaje trata de satisfacer (reducción de residuos, avance de la economía circular), el reciclaje de baterías desempeña un papel fundamental: mitigar los riesgos de una escasez de materias primas para satisfacer la demanda de baterías, esencial para la transición verde en Europa y en todo el mundo.

Dada la propensión de las materias primas críticas a ser el principal cuello de botella de cara a la transición energética, el reciclaje es decisivo para su consecución.

Las baterías son necesarias para todos los vehículos eléctricos, así como para el almacenamiento estacionario que sirve de apoyo a las unidades compactas de generación de energía renovable. Por lo tanto, el reciclaje de baterías es indudablemente necesario, y más concretamente, el de baterías de ion de litio, también denominadas baterías Li-Ion.

Este análisis se centra principalmente en las baterías de vehículos eléctricos. Se estima que más del 80% de las baterías Li-Ion fabricadas van a destinarse a este

Junto a las necesidades generales que el reciclaje trata de satisfacer (reducción de residuos, avance de la economía circular), el reciclaje de baterías desempeña un papel fundamental: mitigar los riesgos de una escasez de materias primas para satisfacer la demanda de baterías, esencial para la transición verde en Europa y en todo el mundo



fin. Con el tiempo, muchas baterías de almacenamiento estacionario procederán de baterías de segunda vida. Por lo tanto, las baterías de los vehículos eléctricos van a ser el principal motor del mercado de las baterías Li-Ion y, por tanto, de su reciclaje.

Li-Ion fabricadas van a destinarse a este fin. Con el tiempo, muchas baterías de almacenamiento estacionario procederán de baterías de segunda vida. Por lo tanto, las baterías de los vehículos eléctricos van a ser el principal motor del mercado de las baterías Li-Ion y, por tanto, de su reciclaje.

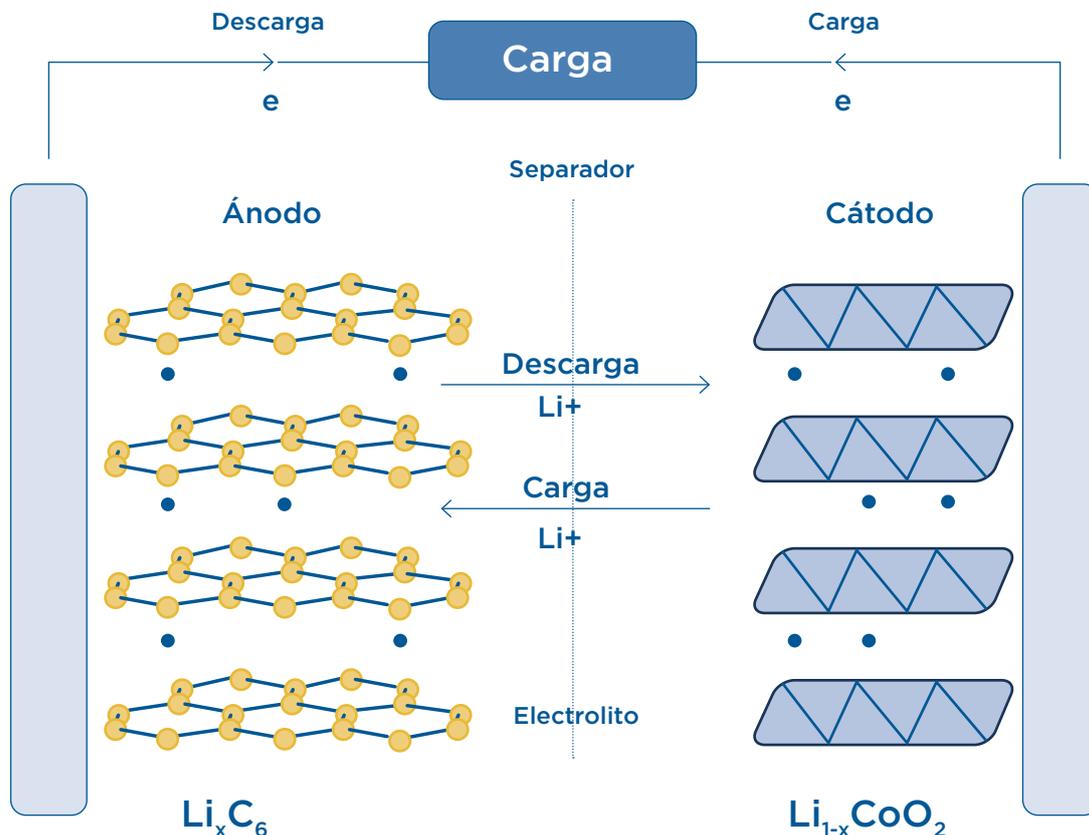
3.1.1 Materiales y composición de las baterías

Una batería es un dispositivo de almacenamiento y descarga de energía

mediante reacciones electroquímicas. En las baterías Li-Ion (en las que se centra este informe, ya que constituyen el principal tipo de batería utilizado para la movilidad y el almacenamiento estacionario), los átomos de litio emiten electrones durante el proceso de carga y los recuperan cuando la batería se descarga.

La batería se compone de tres elementos principales: el cátodo, el ánodo y el separador. Están unidos por componentes orgánicos y sellados en una celda. Esta celda ya es una batería, pero con muy poca potencia. Para aumentarla, las celdas se agrupan en paquetes de baterías que también incluyen un sistema de gestión de baterías (del inglés *Battery Management System-BMS*), un *software* que gestiona el funcionamiento conjunto de las celdas.

Gráfico 15. Funcionamiento de una batería Li-Ion. Fuente: Md Ashiqur Rahaman Khan



Las baterías Li-ion se clasifican según el compuesto químico presente en el cátodo. La primera utilizada en automóviles fue la LCO (óxido de litio y cobalto), pero esta es residual en la actualidad. Otros compuestos químicos son LMO (óxido de litio y manganeso), NMC (níquel, manganeso y cobalto) y LFP (fosfato de hierro y litio). Estos dos últimos son los más utilizados hoy en día.

El ánodo suele ser de grafito, aunque actualmente se están desarrollando ánodos de silicio para reducir el impacto de las materias primas. Sin embargo, el proceso de producción de ánodos de silicio más avanzado sigue siendo mucho más contaminante que el uso de copos de grafito, por lo que se requieren más avances tecnológicos.

El separador es una membrana que suele estar compuesta por un material polimérico y rellena de un líquido, el electrolito, que permite el movimiento de iones de un electrodo a otro. Este electrolito suele ser de sales de litio.

Básicamente, lo que nos interesa obtener de una batería es:

- **Alta densidad energética** (la máxima cantidad de energía en el mínimo espacio).
- **Elevado número de ciclos** (el número de ciclos de carga-descarga que puede soportar la batería antes de perder el 80% de su capacidad inicial).
- **Envejecimiento por calendario reducido** (la cantidad de tiempo en que la batería, estando inactiva, puede mantener el 80% de su carga).

Estas propiedades no suelen confluir, y existen compensaciones entre los compuestos químicos con respecto a estos parámetros.

Al hablar de las realidades y los retos del reciclaje de baterías, nos centraremos en las baterías LFP y NMC, que son las más comunes. Sus procesos de reciclaje y posibles modelos de negocio son diferentes. El electrolito y el cátodo, al

ser similares para todos los compuestos químicos, no presentan características específicas en ambos modelos.

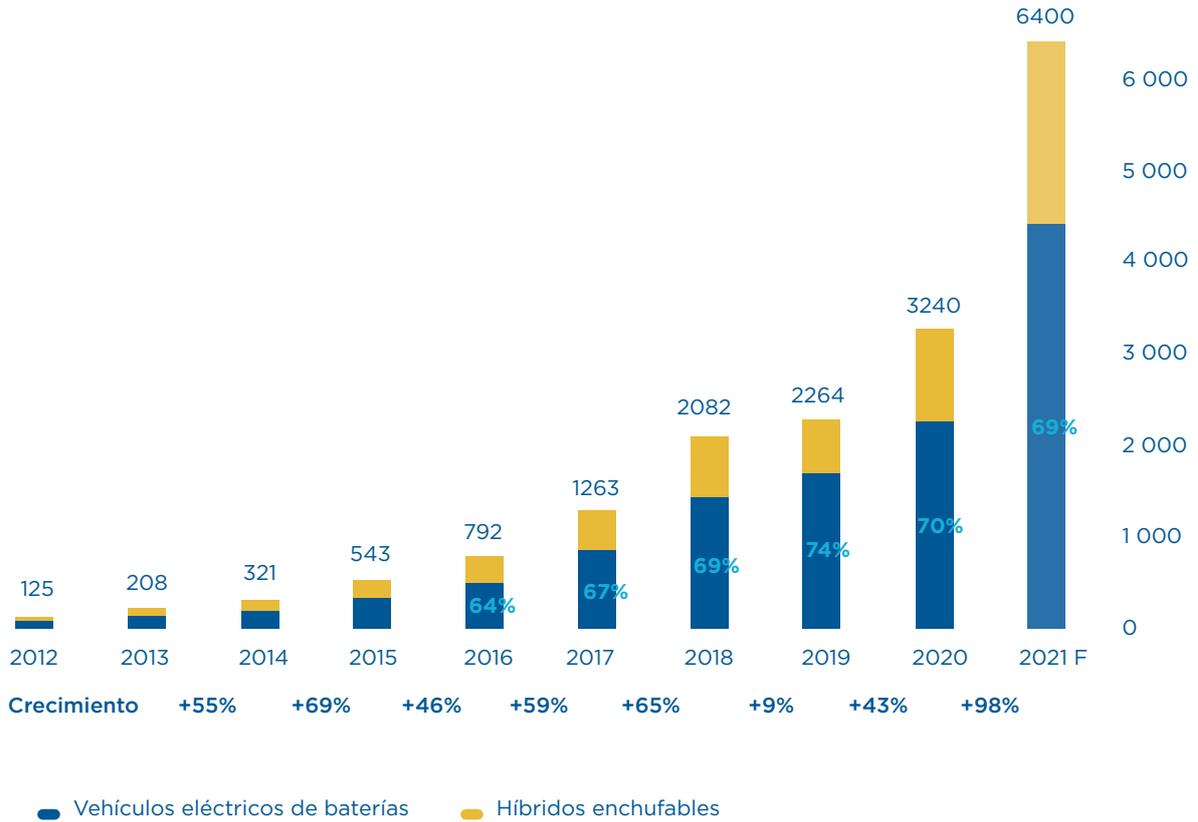
En resumen, la principal diferencia de rendimiento entre las baterías LFP y NMC está en la densidad energética, mayor en el caso de las NMC, y en el número de ciclos de carga, más elevado en las LFP. Así, el compuesto químico NMC se utiliza principalmente para la movilidad, dado el largo alcance que puede proporcionar. El LFP se centra en aplicaciones de movilidad urbana de corto alcance, y también para el almacenamiento estacionario. Otro factor muy importante que diferencia a estos dos compuestos químicos es el calor: las baterías NMC generan mucha energía, de forma que requieren refrigeración para evitar explosiones, mientras que la reacción de las LFP no es tan exotérmica.

3.1.2 Previsiones de demanda de baterías para el mercado de la movilidad

El mercado de las baterías de iones de litio está centrado en la automoción, ya que los vehículos eléctricos (VE) representan más del 80% de las necesidades totales de baterías. La evolución de las ventas de VE será, por tanto, el principal motor del mercado de las baterías, y la vida media de una batería marcará el desfase entre el mercado de los VE y las necesidades de reciclaje derivadas del mismo.

El mercado de los VE está en rápida evolución. Desde 2010, las ventas mundiales de VE han aumentado considerablemente, pasando de menos de 15.000 unidades en 2010 a más de 6 millones de unidades en 2021. En Europa, el mercado de ventas de VE superó los 2 millones de unidades ese mismo año. El siguiente gráfico muestra el crecimiento exponencial de las ventas de VE en todo el mundo, así como el aumento de la cuota de mercado de los VE puros, mientras la de híbridos enchufables (que contienen baterías más pequeñas) disminuye gradualmente. En nuestra opinión, esta tendencia continuará.

Gráfico 16.
Ventas mundiales de vehículos eléctricos. Fuente: EV volumes. (www.ev-volumes.com)



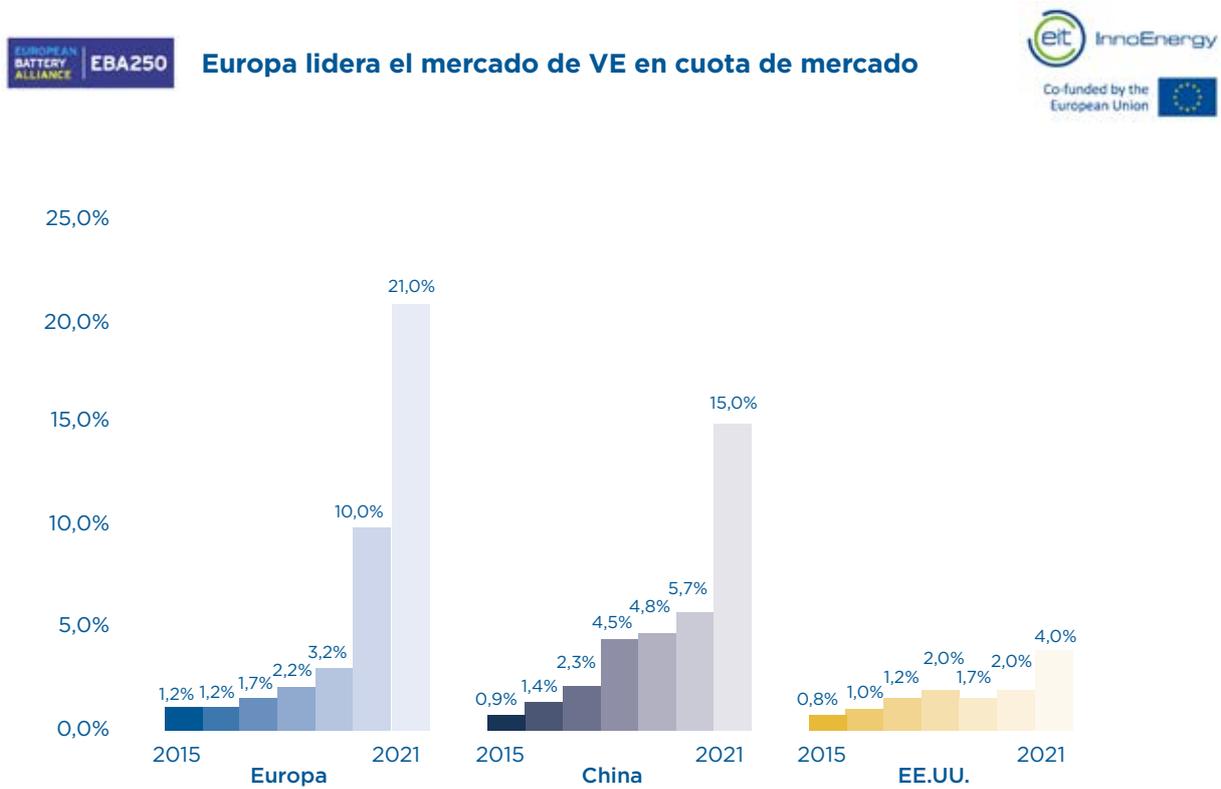
En cifras, China ha sido y sigue siendo el mayor protagonista de este mercado. Pero en términos de cuota de mercado, es Europa quien está tomando la delantera, como muestra el siguiente gráfico. Esto significa que la necesidad de desarrollar infraestructuras de reciclaje para las baterías comercializadas deberá contemplarse en un plazo más corto, ya que el panorama evoluciona mucho más rápidamente que en China. Europa se apuntó posteriormente a esta tendencia, pero está avanzando con mayor velocidad.



6 millones de unidades en 2021 vs 15.000 unidades en 2010

Gráfico 17.

Cuota de mercado de los nuevos turismos eléctricos enchufables por región/país (2015-2021). Fuente: European Battery Alliance.

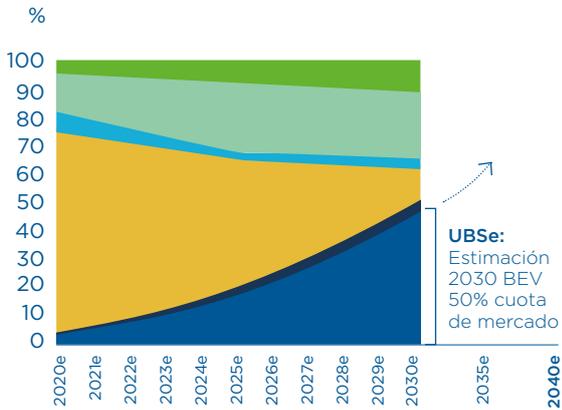


Ventas combinadas UE-AELC-RU.

Además, en el futuro se producirá un mayor crecimiento, ya que se prevé que las ventas de VE representen más del 50% de las ventas totales de vehículos en 2030, y que cada vez un mayor número de fabricantes de automóviles apuesten por los planes de electrificación. Por poner un ejemplo, mientras redactábamos este informe, Stellantis anunció que el 100% de sus ventas en Europa a partir de 2026 será de VE.

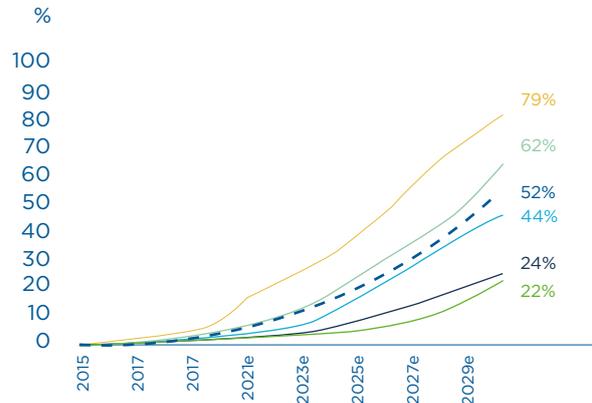
En el futuro se producirá un mayor crecimiento, ya que se prevé que las ventas de vehículo eléctrico representen más del 50% de las ventas totales de vehículos en 2030

Gráfico 18.
Curva de penetración de las ventas mundiales de VE. Fuente: UBSe



- BEV
- PHEV
- Gasolina
- Diesel
- 48V/microhíbrido (gas)
- HEV

Gráfico 19.
Tasas de penetración de VE en los principales mercados. Fuente: UBSe



- Global
- Japón
- Europa
- EE.UU.
- China
- Resto del mundo

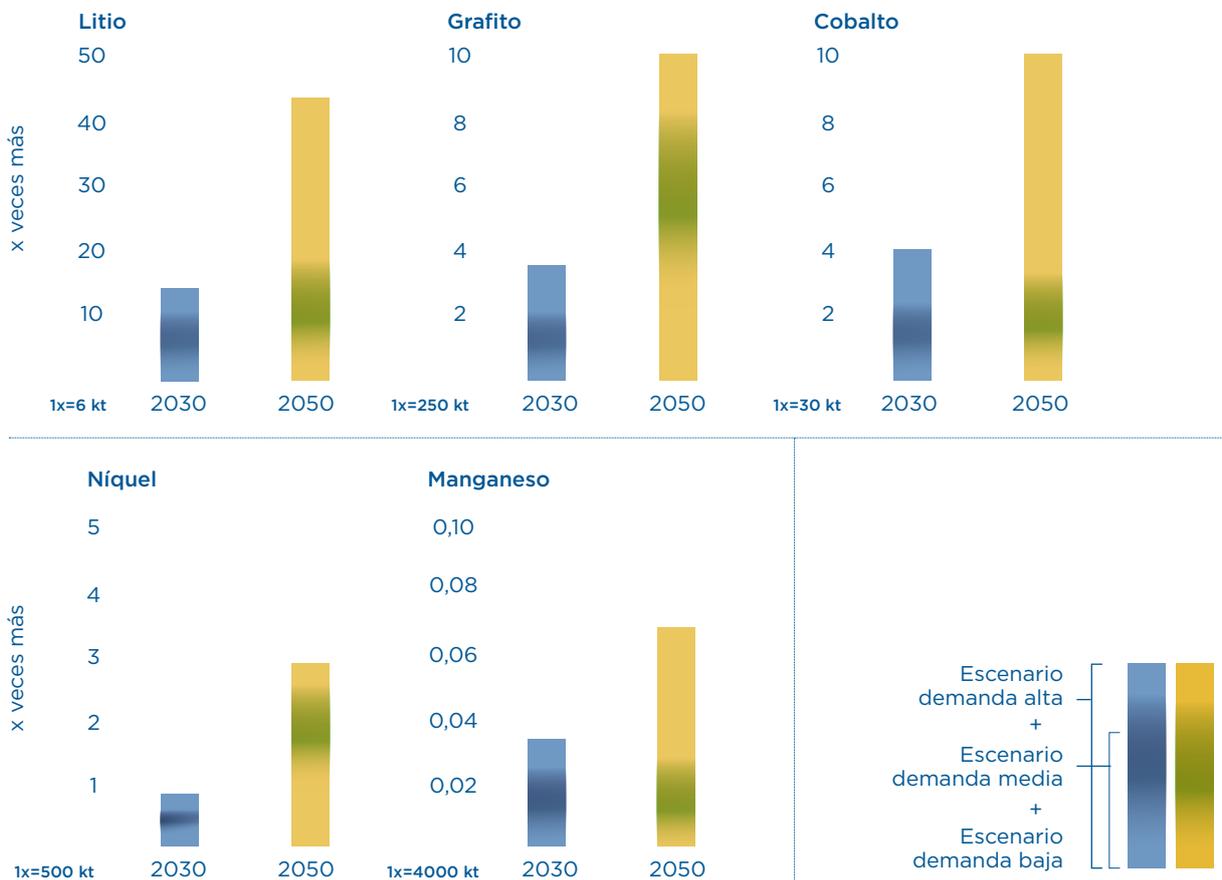
Así pues, la demanda de baterías está en auge y lo seguirá estando. La duda es: ¿de dónde se obtendrán las materias primas para alimentarla? Aquí el reciclaje juega un papel fundamental, ya que la minería no tendrá capacidad para suministrarlas. En la Figura 20 vemos la evolución de la demanda de materiales básicos para baterías desde la actualidad hasta 2050: las necesidades de litio se multiplicarán por 40, las de grafito y cobalto por 10... No es posible (ni deseable) atender estas demandas únicamente con la extracción.

Resumiendo: sin reciclaje, existirá escasez de materias primas. Sin materias primas no es viable la transición verde.

El reciclaje juega un papel fundamental, ya que la minería no tendrá capacidad para suministrarlas. Desde la actualidad hasta 2050 las necesidades de litio se multiplicarán por 40, las de grafito y cobalto por 10...



Gráfico 20.
Consumo adicional de material previsto solo para las baterías de movilidad eléctrica en 2030/2050 en comparación con el consumo actual en la UE del material en todas las aplicaciones. Fuente: Benchmark Minerals.





El ejemplo del litio. ¿Podrá Europa responder a la demanda?

El litio es la materia prima más decisiva para la batería de Li-Ion. Independientemente del compuesto químico que utilicemos, ésta siempre contiene litio en el cátodo y en el electrolito. Y es el elemento cuya demanda aumentará en mayor medida; algunas previsiones la multiplican por más de cuarenta de 2020 a 2050.

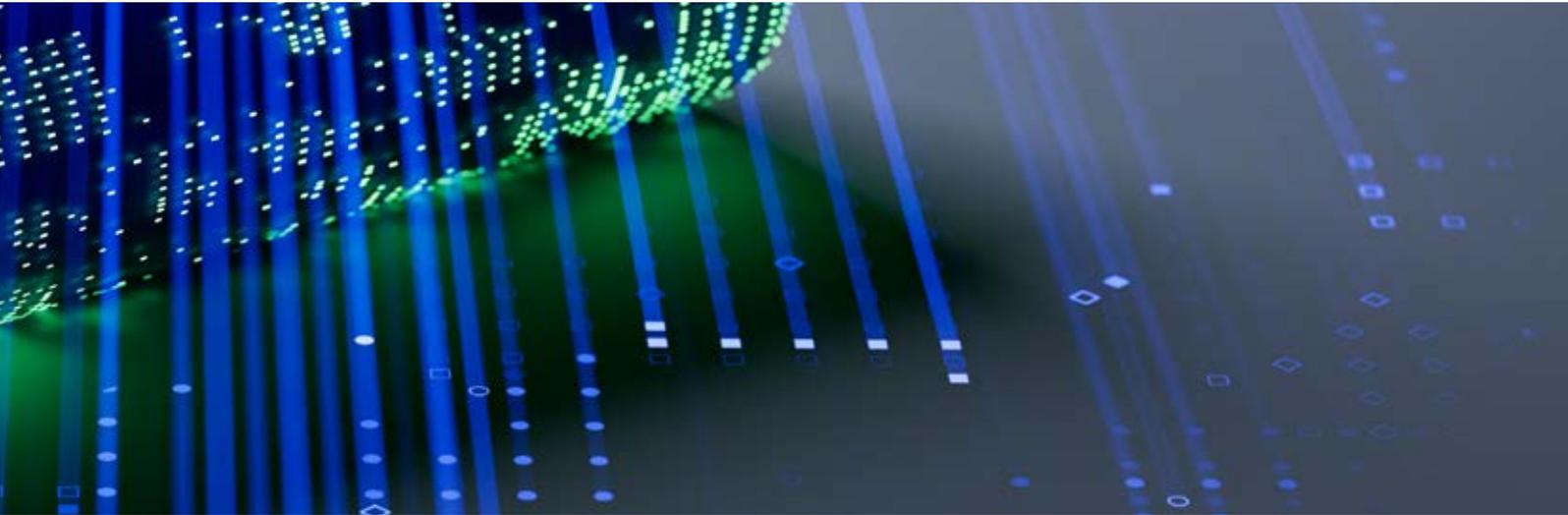
Hasta la irrupción de la batería de Li-Ion, el litio se utilizaba en aplicaciones de bajo valor añadido, básicamente ligadas a la cerámica y la construcción. Era un producto barato y complejo de procesar, por lo que muy a menudo se dejaba sin explotar como residuo o derivado de la minería.

Hoy en día, la cadena de suministro del litio necesario para los mercados de baterías es extremadamente extensa y compleja: se extrae en Australia de la roca o en Sudamérica de la salmuera, se envía a China para su refinado, y posteriormente a Japón o Corea para introducirlo en un cátodo. Posteriormente, viaja a una fábrica de baterías que bien puede estar en Norteamérica, para luego dirigirse a Alemania y ser instalada en un vehículo.

Aparte de la enorme huella de CO₂ derivada de la logística, la pandemia nos ha enseñado que las cadenas de suministro extensas pueden ser muy frágiles, por lo que en **Europa, a través de instrumentos como la Alianza Europea de Baterías y el nuevo Reglamento de Baterías, deben desarrollarse cadenas de suministro locales.**

De hecho, en Europa esto se puede considerar una historia de éxito: actualmente existen más de 35 gigafábricas en construcción y varios operadores asiáticos están buscando ubicaciones para sus plantas de cátodos. Pero, una vez más, ¿qué ocurre con las materias primas necesarias en estas plantas de producción? ¿Y el litio?

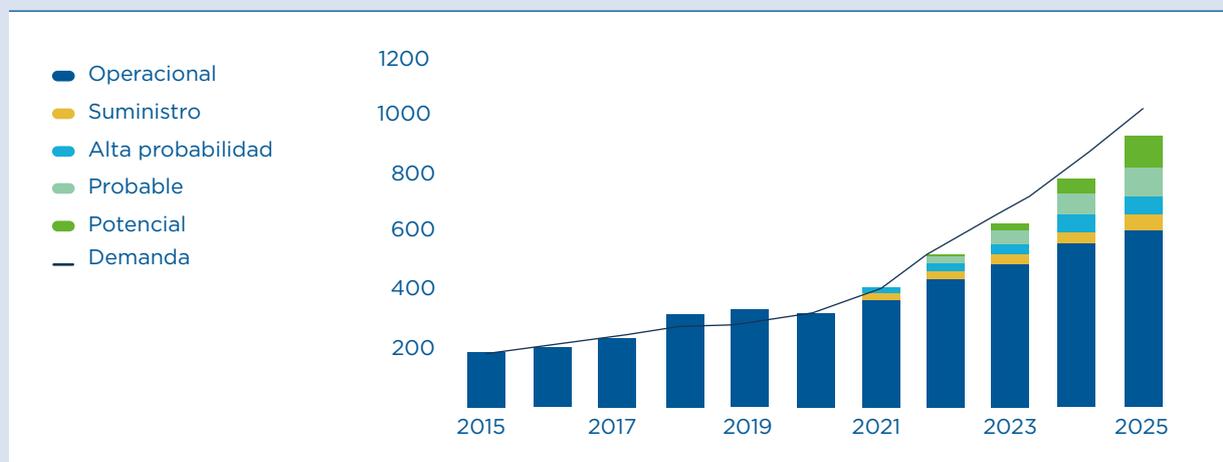
En los dos años de actividad de la Alianza Europea de Baterías en el mercado de las materias primas, el número de proyectos de extracción de litio no se ha incrementado tanto. Los precios del litio acusaron un descenso hasta el tercer trimestre de 2020, por lo que la financiación de los proyectos en desarrollo era muy difícil y escasa. Desde entonces, los mercados han



proporcionado a esos proyectos la financiación requerida. Ahora, la clave del éxito en Europa son los permisos, cuyo proceso de obtención es lento y plagado de obstáculos. Europa lleva tiempo sin ser un continente minero (con la excepción de Escandinavia y algunas otras regiones), y para los ciudadanos no es fácil asimilar que las minas vuelvan a explotarse y quizás incluso estén cerca de sus domicilios. Como ejemplos están los casos de España y Portugal, donde existe muy poca aceptación por parte de los ciudadanos y se requiere una mayor implicación de los gobiernos locales. En este caso es evidente que las medidas europeas serían de utilidad; se corre el riesgo de no poder utilizar los recursos que realmente están disponibles. **La creación de la figura del «proyecto estratégico» puede ser una opción para simplificar la obtención de permisos para proyectos específicos de gran importancia, pero esto no puede reducir los estándares de aprobación, en los que Europa pretende ser líder.**

Gráfico 21.

Déficit potencial creciente a partir de 2021/22. Fuente: Benchmark Mineral Intelligence.



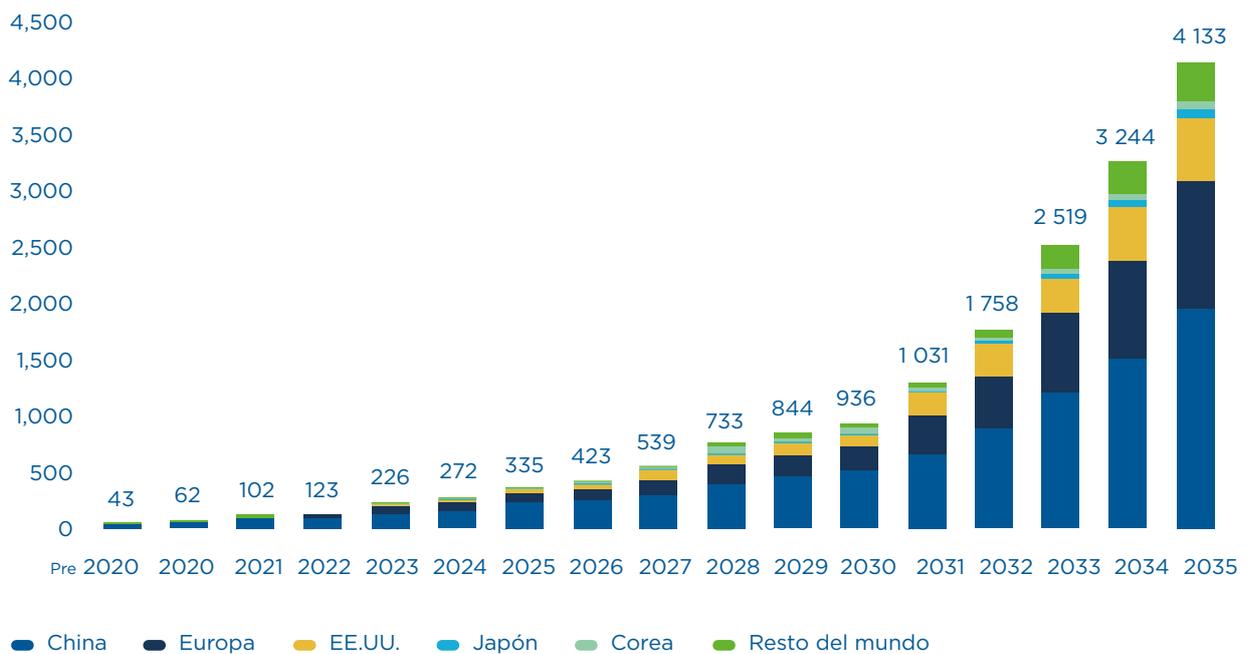
3.1.3 Residuos previstos en el sector de las baterías

La demanda del mercado de los VE en todo el mundo, y especialmente en Europa, es del tipo «palo de hockey», y las baterías comercializadas llegarán al final de su vida

útil en unos 8 o 10 años. Esto significa que, a día de hoy, el número de baterías que han alcanzado el final de su vida útil en el mercado es insignificante, pero será necesario desarrollar rápidamente la capacidad de reciclaje, ya que a partir de 2026-27 estas cifras comenzarán a ser significativas.

Gráfico 22. Retirada anual de baterías por regiones. Fuente: Bloomberg.

Miles de toneladas métricas



 **8-10**

años para el final de vida útil

Como muestra el gráfico anterior, las baterías de los vehículos no alcanzarán cifras importantes hasta dentro de unos años, pero el crecimiento actual ya es del 50%.

Hasta mediados de la década de 2020, China acaparará la mayor parte de las retiradas de baterías, con casi el 100% en la actualidad y alrededor del 70% de los flujos previstos para mediados de este decenio. A partir de entonces, el resto del mundo comenzará a experimentar una aceleración que, en 2032, superará a China y aumentará su intensidad.

China comenzó a apostar por el vehículo eléctrico unos 8-10 años antes que el resto del mundo y, con sus enormes cifras de producción, será el principal proveedor de baterías al final de su vida útil durante algún tiempo. Como veremos en el apartado de tecnologías más adelante, también han logrado grandes avances en este sector.

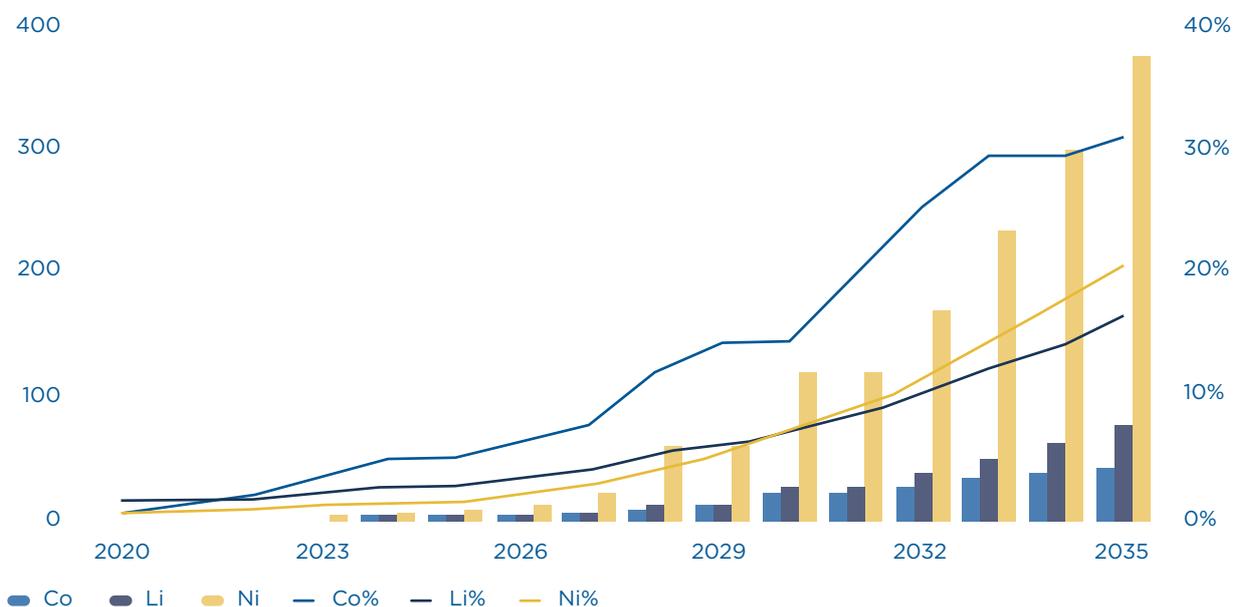
Si se prevé que las cifras no alcancen niveles significativos hasta dentro de 5 años, ¿significará eso que las empresas de

reciclaje no tendrán una afluencia real de material hasta entonces? Lo cierto es que no: hasta entonces, pueden alimentarse de celdas defectuosas y de los desechos industriales de las plantas de fabricación de celdas. De hecho, las gigafábricas son muy ineficientes durante su periodo de arranque, acumulando porcentajes de dos dígitos de productos defectuosos. Por ello, están estructurando su capacidad de reciclaje para poder reutilizar su chatarra y aumentar su viabilidad económica. De ahí que muchos de los grandes operadores del reciclaje de baterías estén vinculados a una gigafábrica. ReVolt en Suecia (perteneciente a Northvolt) y SungEel en Corea (con Samsung como accionista) son dos de estos ejemplos.

Para finalizar este apartado, y para resaltar la importancia del reciclaje en el suministro de materias primas críticas, veamos la estimación de Bloomberg sobre las cantidades necesarias de metales recuperados para satisfacer la demanda de los tres metales incluidos en la lista de materias primas críticas.

Gráfico 23.
Tasas necesarias de recuperación de metales para satisfacer la demanda del mercado mundial. Fuente: Bloomberg.

Miles de toneladas métricas



El cobalto alcanza el 30% en 2035, mientras que el litio y el níquel se mantienen en torno al 20%. Son cifras bastante aventuradas, porque estamos alimentando gran parte de estas demandas con baterías que salieron al mercado hace años (en el caso de la chatarra procedente de la fabricación de celdas, el desfase es muy reducido). Esto significa que las hipótesis sobre el porcentaje de metales que se reciclarán cuando la batería llegue al final de su vida útil son bastante importantes. ¿Existen tecnologías preparadas para ello? Lo veremos en el siguiente apartado.

3.1.4 El mercado español y las iniciativas existentes para el reciclaje de baterías

España se está adaptando lentamente a la movilidad eléctrica. A finales de 2021, el número total de vehículos eléctricos e híbridos enchufables en sus calles era inferior a 130.000 unidades, y su cuota de mercado en 2021 era del 2,8% del total de ventas de automóviles. En ese mismo período, el 21% de los coches vendidos en Europa eran eléctricos e híbridos enchufables.

Por lo tanto, la necesidad de una capacidad de reciclaje de baterías en España será menos urgente, y más basada en los residuos de las instalaciones de fabricación de celdas.

Hemos realizado una simulación de la retirada de baterías en España basada en los siguientes supuestos:

- **La chatarra de fabricación de celdas** se ha calculado en base a la capacidad de fabricación de España en la actualidad, y asumiendo que el 50% de esta capacidad corresponderá a baterías. Como los vehículos que se fabrican en España suelen ser de tamaño reducido, estimamos que la cuota de electrificación

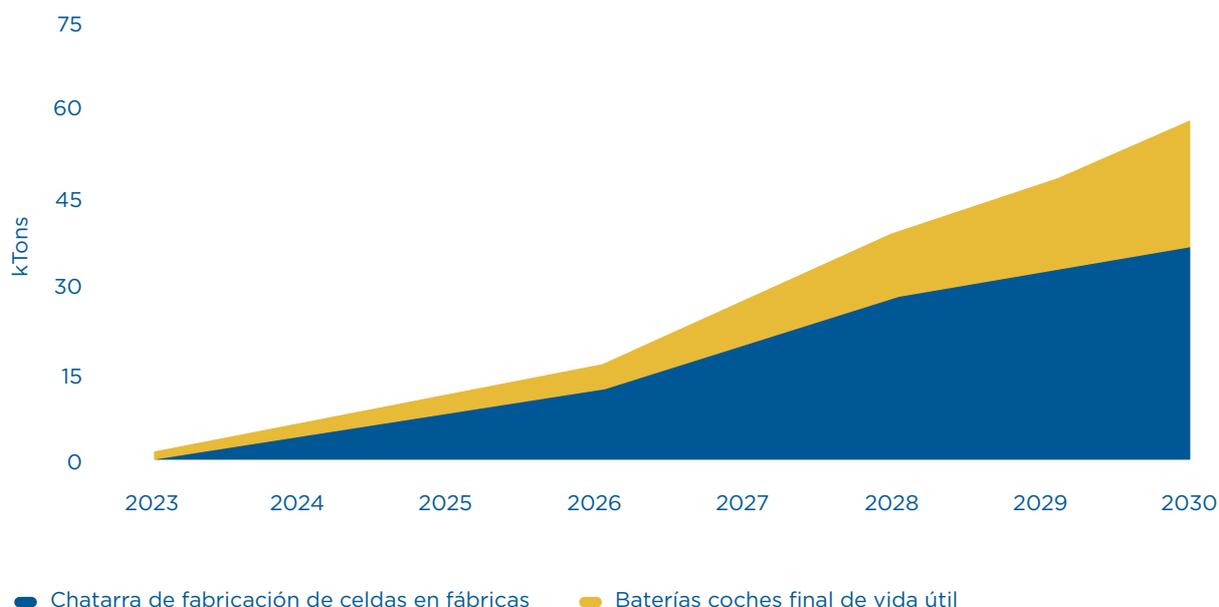
de este segmento será menor que la media, ya que la electrificación suele comenzar en los segmentos premium. La capacidad de baterías necesaria para la producción nos dará el número de GW necesarios para su instalación en gigafábricas en España. Suponemos que el 10% de la chatarra procedente de la producción de las gigafábricas se enviará a instalaciones de reciclaje para ser recuperada.

- **Baterías procedentes de los VE al final de su vida útil.** Nos hemos basado en la previsión de ventas de la Asociación Empresarial para el Desarrollo y la Promoción del Vehículo Eléctrico (AEDIVE). Hemos calculado una vida media de 8 años con una distribución normal, y una tasa de reciclaje del 50%. Esta hipótesis del 50% de reciclado ha sido realizada por el Dr. Eric Melin*, y se basa en el hecho de que se están desarrollando tecnologías que alargan constantemente la vida de las baterías, teniendo en cuenta que estas también se exportarán a países en vías de desarrollo en los que las necesidades de rendimiento son menos estrictas, se desarrollarán más aplicaciones para las baterías al final de su vida útil... Por todo ello, suponer que el 50% de las baterías se reciclarán cuando alcancen los 8 años de vida útil parece bastante sensato.



* Hans Eric Melin, "The Lithium Ion Battery Life Cycle Report 2021".

Gráfico 24.
Retirada de baterías en España.



En España es evidente que la chatarra resultante de los procesos de producción de las gigafábricas supone el porcentaje más elevado. Esto se produce por dos motivos: la importancia de España como fabricante y la reciente adopción de los VE por parte de su población. Esto significa que las iniciativas que se desarrollen en España deberían estar alineadas con una planta de fabricación de celdas que les proporcione un flujo de entrada. Si se basan únicamente en baterías de VE al final de su vida útil, será difícil obtener rentabilidad: la existencia de multitud de modelos de baterías con pocas unidades de cada modelo dificulta enormemente una producción racionalizada.

A día de hoy, en España existen dos iniciativas de reciclaje de baterías de Li-Ion:

- **BeePlanet Factory**, una compañía con sede en Navarra que produce baterías de segunda vida. Planea construir una instalación de reciclaje con tecnología asiática vinculada a un fabricante de celdas.
- Un proyecto de **Endesa y Urbaser** para construir una planta de reciclaje en **Cubillos del Sil** (León), en colaboración con el fabricante de celdas sueco Northvolt.

Suponiendo una capacidad de reciclaje de 10-15kT por operador, es evidente que aún existe margen para más iniciativas.

3.2 Procesos de reciclaje de baterías

El reciclaje de baterías de Li-Ion es hoy una realidad compleja. Existe una falta de estandarización entre los fabricantes de baterías y/o celdas, lo que da lugar a una gran variedad de diseños de productos, formatos y compuestos químicos desarrollados sin tener en cuenta el reciclaje. Sin embargo, estimamos que existen determinados factores que simplificarán esta situación. Por un lado, el aumento del volumen analizado en el último apartado dará lugar a economías de escala. Por otro lado, la creciente participación de los fabricantes de equipos originales de automóviles y de fabricantes de celdas en la cadena de valor del reciclaje (que comentaremos en el apartado 4.3 «Negocio de reciclaje de baterías») traerá consigo la homogeneización de los flujos de baterías al final de su vida útil que lleguen a las fábricas y logrará que el desmantelamiento automatizado sea económicamente viable. Suponemos que la participación de los fabricantes de equipos originales también fomentará el diseño ecológico, lo que permitirá a la industria del reciclaje reducir sus costes de forma significativa en el futuro.

Es posible dividir las tecnologías de reciclaje de baterías en dos categorías principales:

- Pirometalurgia
- Pretratamiento mecánico + Hidrometalurgia

Existen empresas que combinan ambas técnicas.

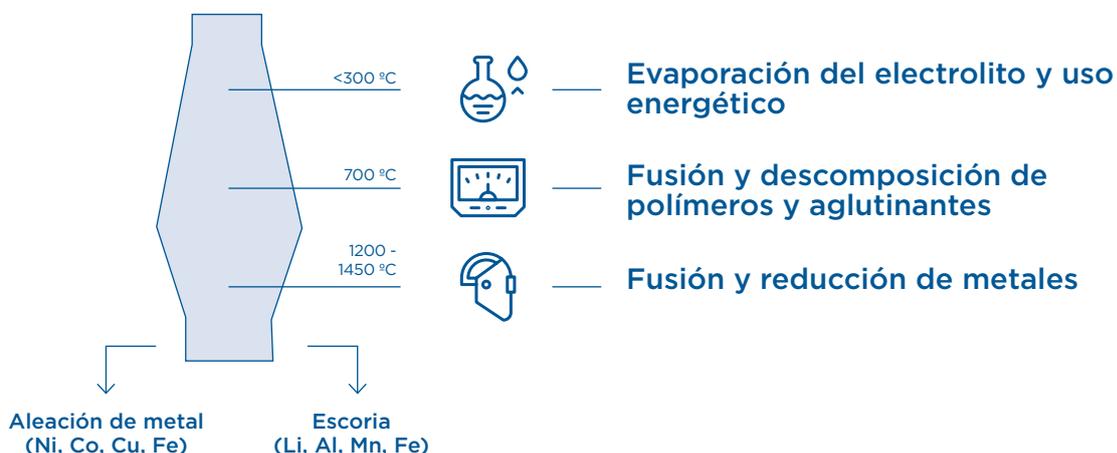
3.2.1 Pirometalurgia

Las celdas de las baterías se introducen en un horno sin tratamiento mecánico previo. También es posible añadir chatarra para aumentar las propiedades termodinámicas y obtener un producto final de mayor calidad.

Este proceso genera un gas por el que se evaporan las sales de litio, los plásticos y los separadores, una escoria que contiene aluminio, manganeso y litio, y una aleación de metal que contiene níquel, cobalto, cobre y hierro.

Ambos flujos son inadecuados para la fabricación de baterías y se destinan a aplicaciones de menor valor. Para recuperar estos metales y utilizarlos en baterías, es necesario aplicar un proceso hidrometalúrgico adicional a la aleación metálica.

Gráfica 25. Reciclaje de baterías. Proceso pirometalúrgico. Fuente: Aachen University





La eficacia del proceso aumenta si se realiza un tratamiento mecánico previo al proceso pirometalúrgico; sin embargo, éste se utiliza más en la hidrometalurgia que en los sistemas pirometalúrgicos puros.

3.2.2 Hidrometalurgia

La hidrometalurgia utiliza un proceso en dos etapas, que comienza con un pretratamiento mecánico que produce lo que se denomina «masa negra», seguido de la planta química. Estos procesos suelen realizarse a distancia uno del otro y, como la diferencia de costes de capital de ambos es considerable (la parte hidroeléctrica puede ser fácilmente 10 veces más elevada), esto constituye una razón para dispersar en un territorio varias plantas de tratamiento mecánico que abastecen a una planta hidroeléctrica centralizada, lo que permite ahorrar costes logísticos.

Pretratamiento y producción de la «masa negra»

El tratamiento previo consta de varias fases:

- **Descarga eléctrica**, para evitar cualquier riesgo en la manipulación que se realizará posteriormente.
- **Desmantelamiento de partes externas**, para acceder a los diferentes módulos (cajas, cableado, electrónica).

- **Trituración de los módulos**. Se suele realizar por lotes organizados por compuestos químicos para maximizar la eficacia del proceso, evitando la contaminación cruzada entre ellos. Esta fase se realiza en una atmósfera inerte (seca o húmeda) por razones de seguridad. Algunos operadores de reciclaje realizan una segunda fase de trituración para disminuir el tamaño de las partículas y poder separar más fácilmente las impurezas.

- **Separación de materiales**. Algunos metales pueden extraerse mediante procesos mecánicos: cribado, separación magnética, hidrofobia, densimetría, etc.

Tras estas fases de pretratamiento, se obtienen flujos separados de plásticos, materiales férricos, aluminio, cobre, carbono y un polvo negro conocido como «masa negra». Este último flujo contiene los materiales catódicos: níquel, cobalto, litio y manganeso. Este fundente es el que se incorpora al «proceso hidrometalúrgico».

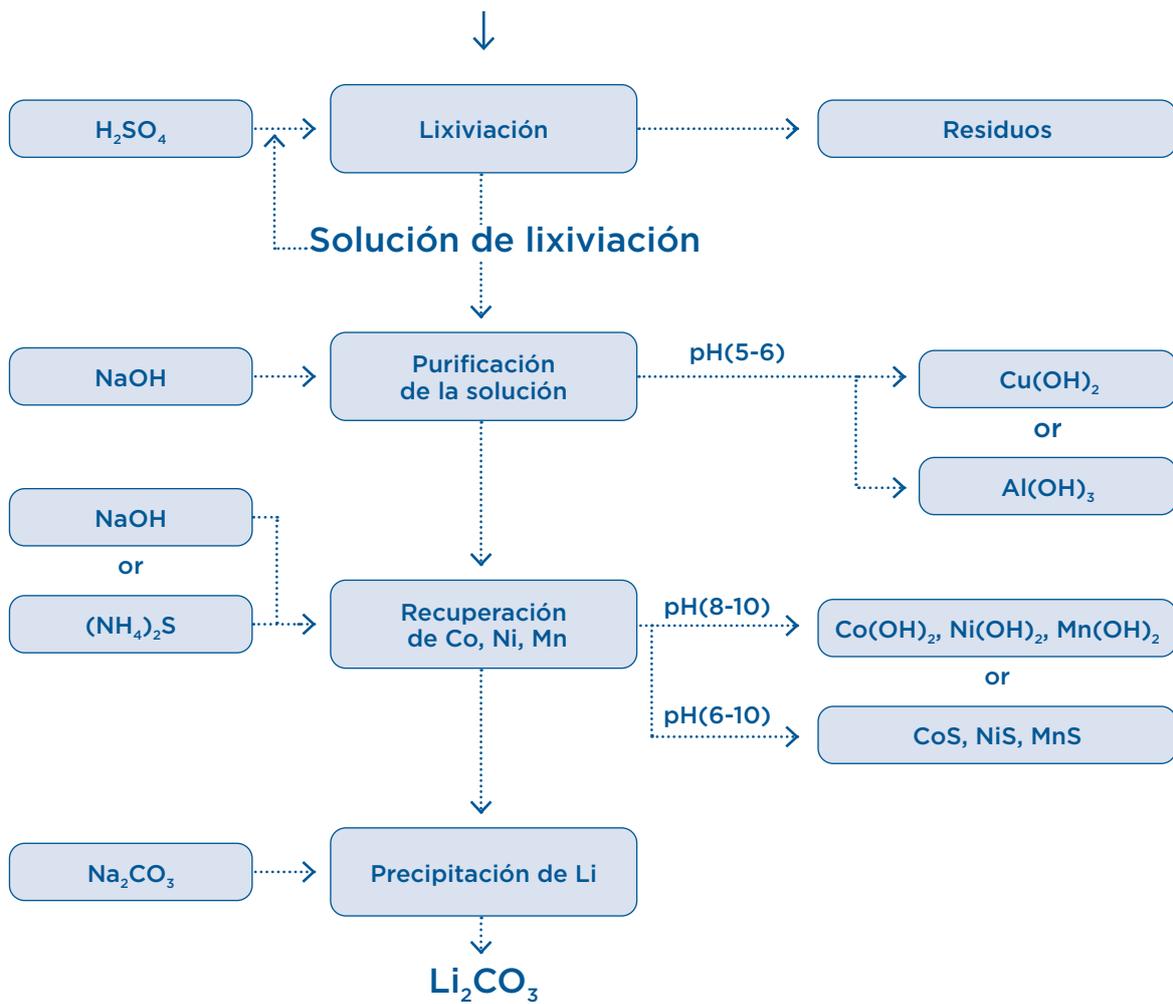
En ocasiones, la masa negra también se somete a un proceso pirometalúrgico para eliminar las impurezas orgánicas que pueda contener procedentes de los aglutinantes y separadores.

Proceso químico

Gráfico 26.

Proceso hidrometalúrgico para el reciclaje de baterías. (Fuente: Universidad de Aquisgrán)

Polvos de electrodos de baterías Li-Ion de automóviles



A continuación, se describe el sistema más utilizado hoy en día en la industria, aunque no se trata del único.

En primer lugar, la masa negra se introduce en una solución de **lixiviación** (normalmente ácido sulfúrico). Esto disuelve los diferentes metales que contiene.

El siguiente paso es la **purificación**, en el que se añade hidróxido de sodio (NaOH) para precipitar las impurezas, el cobre, el hierro y el aluminio. En este proceso es muy importante controlar el pH para evitar las precipitaciones de los metales que queremos mantener en el proceso. Este proceso se repite varias veces por recirculación.

La siguiente fase es la **recuperación de metales valiosos**, en dos etapas:

En la primera etapa, se añade de nuevo hidróxido de sodio (o sulfuro de amonio (NH₄)₂S) y se lleva la solución a un pH más alto, provocando la precipitación de cobre,

níquel y manganeso en forma de hidróxido o azufre. Posteriormente, en una segunda etapa, la solución resultante se ataca con carbonato de sodio (Na₂CO₃) para precipitar el litio en forma de carbonato (Li₂CO₃).

Cada etapa descrita se repite varias veces mediante recirculación hasta alcanzar los niveles de pureza requeridos.

3.2.3 Combinación de pirometalurgia e hidrometalurgia

Algunos operadores de reciclaje utilizan una combinación de métodos pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos. Concretamente, durante la fase mecánica del proceso hidrometalúrgico explicada en el apartado anterior, se utiliza un horno para eliminar los elementos orgánicos y aumentar la pureza de la masa negra antes de pasar a la parte hidrometalúrgica del proceso.

Tabla 8.
Descripción e índices de recuperación.

Componente químico	Li	Ni	Co	Cu	C
Pirólisis	0%	40-60%	40-60%	n.c.	0%
Pirólisis + Hidrometalúrgico	50-60%	>95%	>95%	>95%	0%
Mecánico + Hidrometalúrgico	>90%	>99%	>99%	>99%	0%

Tabla 9.
Rentabilidad del reciclaje. Fuente: Faraday Institution.

Compuesto químico cátodo	Li	Ni	Co	Mn
NMC622	13%	61%	19%	20%
NMC811	11%	75%	9%	9%
NMC111	15%	40%	40%	37%
LFP	10%	0%	0%	0%
NCA	10%	67%	13%	0%

La rentabilidad del reciclaje de baterías está intrínsecamente ligada al valor de los productos derivados obtenidos al final del proceso. Cuanto mayor sea el número de materias primas contenidas en la masa negra, más ingresos podrá obtener el operador de reciclaje. Por lo tanto, los compuestos químicos que contengan más materias primas en el cátodo serán los más rentables para la actividad de reciclaje. En el gráfico anterior, podemos ver que las baterías NMC son las que utilizan más materiales críticos. Los compuestos químicos NMC están

evolucionando hacia un menor contenido de cobalto y mayores niveles de níquel y manganeso. Las baterías LFP sólo contienen litio como material crítico, por lo que no contienen cobalto, manganeso o níquel. Esto las hace menos vulnerables a la escasez de materias primas, aunque su reciclaje es también mucho menos rentable. Podemos verlo en el siguiente gráfico, donde el reciclaje de las baterías LFP es alrededor de un 60% menos rentable que el de los compuestos químicos medios de las NMC.

Tabla 10.
Rentabilidad del reciclaje de baterías en base a los compuestos químicos del cátodo.
Fuente: Circular Energy Storage.

Material	USD/kg	NCM111	NCM523	NCM622	NCM811	NCA	LFP	LMO	LCO
Revestimiento									
Acero	0.29	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%
Aluminio	1.8	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%
Colectores de corriente									
Aluminio	1.8	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%
Cobre	6.0	7%	7%	7%	7%	7%	7%	7%	7%
Material ánodo									
Grafito	1.2	18.1%	18.1%	18.1%	18.1%	18.1%	18.1%	18.1%	18.1%
Material cátodo									
Manganeso	2.4	6.1%	5.5%	3.6%	1.8%			19.4%	
Litio	70.0	2.3%	2.3%	2.3%	1.9%	2.3%	1.4%	1.2%	2.3%
Cobalto	30.0	6.5%	3.9%	3.9%	1.9%	2.9%			19.3%
Níquel	12.0	6.5%	9.7%	11.6%	15.4%	15.6%			
Aluminio	1.8					0.4%			
Hierro	0.4						11.3%		
Valor \$/kg		5.42	5.02	5.19	4.77	5.32	1.97	2.26	8.30

3.2.4 Reciclaje de futuros compuestos químicos

La tendencia hacia nuevos compuestos químicos en las baterías de Li-Ion conduce a las baterías de estado sólido y semisólido. No prevemos grandes retos tecnológicos para obtener buenos resultados de recuperación en el reciclaje de estos compuestos químicos, ya que el proceso no será muy diferente al que ya se utiliza para los compuestos químicos NMC. Incluso se espera que ocurra justo lo contrario, con tasas de recuperación mejoradas para las baterías de estado sólido, ya que la lámina metálica del ánodo se sustituirá por un metal de litio completo, y la separación de un electrolito sólido será un proceso más fácil que la gestión de un electrolito saturado.

Otra tendencia futura es la de los compuestos químicos Na-ion o ion sodio, cuyas primeras unidades se encuentran todavía en fase de I+D. Para este compuesto químico, que no requiere litio, el principal reto es recuperar las sales y encontrarles aplicaciones, en lugar de retornarlas a la industria de las baterías. El sodio no es escaso en la naturaleza, y el paradigma de reciclaje para este tipo de baterías es más estándar: no se pueden depositar los residuos, y será necesario encontrar nuevas aplicaciones, pero a los propios fabricantes de equipos originales no les resultará tan esencial involucrarse en el negocio.

3.3 Presente y futuro del marco regulador de las baterías

3.3.1 Normativa actual

La legislación referente al reciclaje de las baterías de Li-Ion en Europa se basa en tres directivas de la UE:

- 2006/66/CE, referida a las baterías, acumuladores y su reciclaje. Esta directiva está transpuesta hoy en España por el Real Decreto RD106/2008, y también el RD 710/2015 y el RD 27/2021 que los modifican.
- 2000/53/CE, referida a la gestión de vehículos al final de su vida útil. Esta directiva está transpuesta hoy en España por el Real Decreto RD1383/2002, y también el RD 774/2016 y el RD265/2021.
- 2012/19/CE, referida a los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos. Esta directiva se transpone en España a través del RD110/2015 y el RD 27/2021.

Básicamente, esta legislación introdujo en el mercado la obligación de que los productores reciclen las baterías, prohibiendo el vertido y obligándoles a establecer Sistemas Colectivos de Responsabilidad Ampliada del Productor (SCRAP) que financien la recogida y el reciclaje de las baterías introducidas en el mercado.

En España, el principal SCRAP para el reciclaje de pilas es Ecopilas, con cerca de 45.000 puntos de recogida que recogieron más de 7.300 toneladas de pilas en 2021, entre las cuales las baterías de Li-Ion para automóviles son todavía muy escasas.

3.3.2 El futuro inmediato: una nueva normativa para las baterías

En diciembre de 2020, la UE anunció una propuesta de un nuevo reglamento sobre baterías y residuos de baterías que sustituiría a la Directiva 2006/66/CE mencionada en el apartado anterior. El hecho de que sea un reglamento en lugar de una directiva (por tanto, de obligado cumplimiento desde el día de su publicación, sin necesidad de ser transpuesta por los Estados miembros) da una idea de la importancia que Europa otorga a este tema.

Amplía los objetivos del reciclaje de baterías, con los siguientes puntos clave:

- Establece una categoría aparte para las baterías de vehículos.
- Establece objetivos de reciclado, por peso de la batería (eficiencia del reciclaje), por tipo de metal -litio, cobalto, níquel y cobre- (índices de recuperación) y por contenido reciclado en las baterías de nueva producción.
- Otorga la responsabilidad del producto al final de su vida útil a los productores y distribuidores.
- Obliga a los responsables del producto a establecer puntos de recogida cerca de los usuarios finales, aunque no sean rentables.

- Hace hincapié en la trazabilidad a través de la obligación de informar, etiquetar y establecer un «pasaporte» para las baterías, un identificador electrónico único para cada batería.
- Las baterías de segunda vida se consideran productos nuevos. No se establecen objetivos para ellas. Los productores de estos kits son responsables de su tratamiento al final de su vida útil: estas baterías se convierten en un nuevo producto cuando se reutilizan para una segunda vida.

Se prevé que el nuevo reglamento sobre baterías se publique a lo largo de 2022.

Tabla 11.
Requisitos de la normativa sobre baterías para su reciclaje.

Desde	2025	2026	2030	2035
Eficiencia del reciclaje	65% del peso medio de las baterías Li-Ion		70% del peso medio de las baterías Li-Ion	
Índice de recuperación	90% del Co, Ni y Cu		95% del Co, Ni y Cu	
	35% del Li		70% del Li	
Contenido reciclado en baterías	20% del Co			
			12% del Co	35% del Ni
			4% del Ni y Lu	10% del Li

Se prevé que el nuevo reglamento sobre baterías se publique a lo largo de 2022



4

Debate: ¿cómo definir el modelo de negocio de reciclaje adecuado?

4.1 Negocio de reciclaje de paneles fotovoltaicos

4.1.1 Iniciativas de negocio existentes en
España

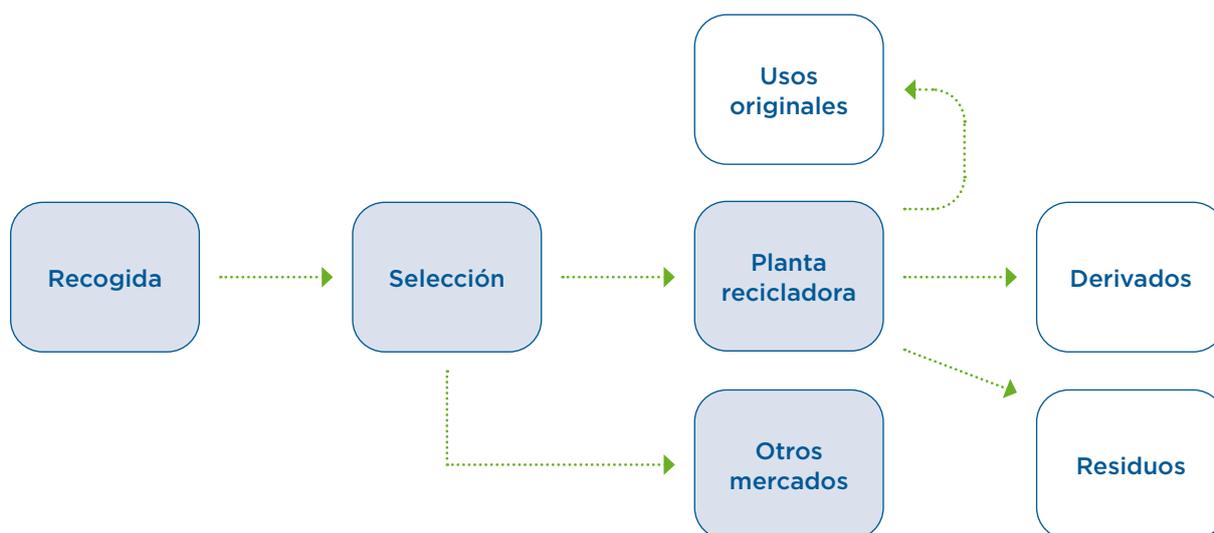
4.2 Negocio de reciclaje de energía eólica

4.3 Negocio de reciclaje de baterías



Todo modelo de reciclaje puede ser definido de la siguiente forma:

Gráfico 27.
Etapas básicas de un modelo de negocio de reciclaje de productos.



En primer lugar, existe una fase de recogida, que será más o menos compleja en función de la capilaridad necesaria para la recogida de los flujos de residuos. Por ejemplo, el sistema de recogida de residuos generados en los hogares requerirá una gran capilaridad, mientras que el destinado a la recogida de residuos generados en aplicaciones industriales muy especializadas no la requerirá. Este es el caso, por ejemplo, del polvo de los hornos de arco eléctrico generado en las acerías y utilizado posteriormente en la industria del zinc electrolítico.

Posteriormente se realiza un proceso de selección que separa los residuos en dos flujos básicos: los que pueden tener un segundo uso en otros mercados «en su estado actual» (este es el caso de la ropa usada a la que se le da un segundo uso a través de las tiendas *vintage*) y aquellos que no pueden tener ninguna otra aplicación y necesitan pasar por el proceso de reciclaje para ser transformados en otros materiales que puedan tener otros usos.

El proceso de reciclaje (aquí simplificado como «planta de reciclaje», pero que puede constar de varias etapas en diferentes zonas geográficas) genera unos productos derivados. Algunos tienen la suficiente calidad como para retornar a la aplicación original de la que proceden, y otros necesitan destinarse a otros usos, generalmente (pero no siempre) con un menor valor añadido. Y, obviamente, puede existir un flujo de residuos finales en el proceso de reciclaje que los operadores de la planta tratarán de minimizar

Para implantar un sistema de reciclado que sea eficiente, debe basarse no sólo en la ética y la responsabilidad social de las empresas, sino también en la normativa y en un modelo de negocio sostenible. Este es un factor clave para entender los diferentes papeles que los operadores asumen en los modelos de negocio.

Lo más habitual en un mercado de reciclaje es que requiera financiación, o bien porque el coste del proceso de reciclaje (desde la recogida hasta la producción y venta de productos derivados) es más elevado que la compra directa del producto nuevo, o bien porque los productos derivados que se obtienen son técnicamente pobres, por

lo que es necesario venderlos para otros usos de menor valor añadido. En Europa, el reciclaje de productos al final de su vida útil es obligatorio por ley, aunque el envío a vertedero de los mismos no se ha erradicado por completo. La responsabilidad del reciclaje suele recaer en los propietarios del producto, en la mayoría de los casos los productores. El método habitual es asociarse con otros productores que comparten el mismo problema y crear un SCRAP (Sistema Colectivo de Responsabilidad Ampliada del Productor) y financiarlo con la llamada «ecotasa» que abonan los clientes finales al adquirir un producto nuevo. Esta ecotasa financia todo el proceso de recogida y reciclaje.

Gráfico 28.
Funcionamiento de un Sistema Colectivo de Responsabilidad Ampliada del Productor (SCRAP).





Si los propietarios de los productos consideran el reciclaje como un sustituto de sus materiales vírgenes y pueden obtener un beneficio por ello, existirá la posibilidad de que los productores participen activamente en el negocio del reciclaje

Si el sistema de reciclaje es rentable (es decir, los costes de los bienes obtenidos en el proceso de recogida y reciclaje son menores que los ingresos generados por la venta de productos derivados), se deja en manos del mercado. La implicación de los propietarios de los productos al final de su vida útil dependerá básicamente del porcentaje de derivados que retornen a la aplicación original: si los propietarios de los productos consideran el reciclaje como un sustituto de sus materiales nuevos y pueden obtener un beneficio por ello, existirá la posibilidad de que los productores participen activamente en el negocio del reciclaje (organizando sus propios sistemas de recogida, participando

en el capital de las plantas de reciclaje, etc.) mediante la firma de acuerdos de circuito cerrado con los operadores de reciclaje: «Llevo mi flujo de productos al final de su vida útil a tu planta para que los recicles, pero los derivados retornarán a mí». De hecho, esto ocurrirá principalmente si los productos derivados que se van a recuperar son escasos en el mercado «virgen». Si este no es el caso, los productores tenderán a dejar que el mercado se encargue de sus productos derivados y no se involucrarán en un negocio -el de la gestión de residuos- que suele verse como «complejo», «diferente» y con las implicaciones «No en mi patio trasero».

4.1 Negocio de reciclaje de paneles fotovoltaicos

Existe un importante componente de generación de valor en el negocio de la gestión de residuos fotovoltaicos y su circularidad. Un modelo bien planteado puede ser muy significativo, económicamente y en términos de creación de empleo. Según una previsión de la Agencia Internacional de Energías Renovables, el valor del mercado mundial de las materias primas recuperadas de los

paneles solares podría alcanzar los 450 millones de dólares en 2030. En otras palabras, esta cantidad de materias primas sería aproximadamente la misma que se necesita para construir 60 millones de nuevos paneles solares o para generar 18 GW de electricidad. La misma previsión indica que en 2050 el valor de los materiales recuperables podría superar los quince mil millones de dólares, lo que bastaría para alimentar 630 GW con dos mil millones de paneles solares. Estos valores no pueden ser considerados definitivos si tenemos en cuenta los ambiciosos objetivos revisados anualmente en términos de capacidad fotovoltaica acumulada mundial, con tendencia a aumentar.

Gráfico 29.
Generación potencial de valor de una industria de gestión de residuos fotovoltaicos.

Generación potencial de valor

¿Una nueva industria de gestión de residuos?



Lo cierto es que casi todos los elementos de un módulo fotovoltaico son reciclables, aunque no rentables. Si bien los avances tecnológicos están reduciendo notablemente el uso de materiales, todavía existen materiales específicos que son extremadamente valiosos y no tan abundantes. Por tanto, la clave para desarrollar un negocio estable es separar adecuadamente todos los componentes, de modo que los materiales críticos y más valiosos puedan recuperarse y reutilizarse en la misma industria o en otras diferentes. Pensemos en la subida del precio del silicio del pasado año, un aumento del 300% debido a la escasez del metal provocada por un recorte de la producción en China. Y el silicio no es un caso aislado, esto también afecta a otras materias primas, cuyos precios están registrando un incremento extraordinario en los últimos meses. La plata es otro metal del que Europa es muy dependiente, con importaciones constantes.

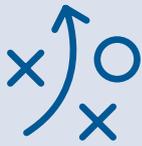
Esta dependencia de Europa de materias primas críticas que son insumos de la cadena de suministro de la energía fotovoltaica crea una situación estratégica que podría determinar el futuro de la UE en materia de implantación fotovoltaica. La situación exige un marco adecuado para mitigar este riesgo. Las industrias y los socios de I+D en Europa están trabajando para desarrollar los modelos de negocio adecuados que permitan abordar la reciclabilidad y la huella de carbono de las tecnologías solares.

Para conseguir un modelo de negocio efectivo, las tecnologías de reciclaje deben ser capaces de funcionar a gran escala. Actualmente se generan decenas de miles de toneladas de residuos fotovoltaicos al año y solo unas pocas miles de toneladas son recicladas de forma ineficiente, y esto es sólo el principio. Además, la infraestructura y los equipos de reciclaje son caros, por lo que se necesita una fuente de financiación para cubrir los elevados costes de tratamiento y recogida. Y el mayor reto es que la tecnología existente es bastante reciente y en un principio habrá pocos volúmenes que



Las industrias y los socios de I+D en Europa están trabajando para desarrollar los modelos de negocio adecuados que permitan abordar la reciclabilidad y la huella de carbono de las tecnologías solares

tratar, por lo que las empresas son reacias a invertir por el riesgo y la incertidumbre de que sea un negocio rentable. En definitiva, en términos de tecnología, el mercado está preparado y contrastado, pero lo que se requiere es invertir en la ampliación de la capacidad. A modo de ejemplo, en el siguiente recuadro explicamos el modelo de negocio desarrollado por ROSI Solar para el mercado francés del reciclaje.



El modelo de negocio de ROSI Solar

Durante la entrevista con ROSI, también conocimos su experiencia en el posicionamiento en el mercado francés y la definición del modelo de negocio de su empresa.

En Francia han constituido un SCRAP llamado Soren que gestiona la recogida en más de 300 puntos diferentes de todo el país, desde puntos de residuos sólidos urbanos hasta grandes instalaciones fotovoltaicas en proceso de desmantelamiento. Pero la pregunta clave que realmente define cualquier negocio es siempre: ¿quién paga? En Francia, el coste de cada módulo nuevo incluye una ecotasa, que constituye la fuente de financiación de la gestión al final de la vida útil realizada por Soren. En otros países en los que existe más de un SCRAP, estos fondos se reparten. En Países Bajos, por ejemplo, con una tasa similar a la de Francia, supone todo un reto prestar un buen servicio de reciclaje porque el volumen de módulos que reciben es demasiado bajo. En Francia, cada año se utilizan más de 100.000 toneladas de material fotovoltaico en nuevas plantas, mientras que Soren sólo recoge unas 5.000 toneladas. Por ello, este modelo funciona de momento, ya que en realidad se gravan 20 veces más paneles de los que se recogen, pero en los próximos años, con el aumento previsto de residuos fotovoltaicos, habrá que ajustar el modelo y el impuesto.

El siguiente paso en el modelo de negocio francés es la selección de los operadores de recogida encargados de entregar los residuos. En este caso, una vez desmantelada la planta, los módulos pueden entregarse sin cargos adicionales para el propietario o gestor de la planta, ya que el impuesto de reciclaje ya fue abonado por el productor. A continuación, Soren selecciona a los operadores de reciclaje que reciben los residuos a tratar mediante una licitación basada en una tasa de reciclaje. El pasado año, ROSI se adjudicó la licitación para convertirse en uno de los 3 operadores de reciclaje seleccionados para Francia.

La cuestión que se plantea en el modelo de negocio de ROSI es cómo obtener beneficios. Por un lado, con la tasa de reciclaje que se cobra a Soren, y por otro, con la venta de los materiales, que son de alto valor y, por tanto, muy demandados por varios compradores de diferentes industrias. En un futuro ideal, los residuos fotovoltaicos deberían recuperarse para ser reutilizados en la fabricación de productos fotovoltaicos con el fin de crear un ciclo cerrado dentro de la industria. Sin embargo, esa realidad está aún lejos de ser factible.

A partir del próximo año, la primera línea de reciclaje de ROSI podrá recuperar 60 toneladas de silicio. El volumen de silicio integrado en los paneles fotovoltaicos puestos en el mercado en Europa el año pasado alcanzó más de 90.000 toneladas. A pesar de esta cruda realidad, **en el mercado empiezan a aparecer algunos consumidores de silicio en Europa que adquieren una pequeña parte de sus insumos a partir del silicio reciclado como forma de reducir su impacto medioambiental. Este es un primer paso para alcanzar ese objetivo medioambiental estratégico.**

Los cambios en la composición de los módulos también podrían afectar al diseño de los sistemas de reciclaje y al valor de los materiales recuperados. Por tanto, el emergente mercado del reciclaje de módulos deberá estar al tanto de los cambios en la composición de los mismos, y además deberá iniciar conversaciones con los fabricantes tanto para el intercambio de información como para explorar el potencial del diseño de los módulos para facilitar la recuperación de materiales.

Aunque continúa siendo un objetivo y no una realidad, en Europa el mercado ya habla del panel del futuro, uno fabricado con materiales 100% reciclados. Sobre todo, teniendo en cuenta los ahorros millonarios y otros beneficios que podrían generarse.

4.1.1 Iniciativas de negocio existentes en España

En España, se han generado algunas iniciativas empresariales en el sector desde el ámbito de la fabricación. El pasado año, por ejemplo, la empresa alemana Rinovasol inauguró en Pamplona el primer centro de fabricación, reparación y reciclaje para potenciar la economía circular en torno a la industria fotovoltaica. Además de disponer de una capacidad de producción de 50 MW para paneles nuevos, en la planta reciben paneles usados, los reparan, los certifican y los introducen de nuevo en el mercado, con una nueva ficha técnica y una garantía de 5 años. En los casos en los que el panel no es recuperable, se envía a su planta en Alemania para reciclar las materias primas.

Otras iniciativas que permiten desarrollar modelos de negocio rentables en torno a la economía circular fotovoltaica en España son los incentivos, entre los que destaca el reciente certificado lanzado por la Unión Española Fotovoltaica (UNEF) sobre la Excelencia para la Sostenibilidad y la Conservación de la Biodiversidad en las Plantas Fotovoltaicas. El objetivo

es mejorar el entorno local en el que se implanta la energía fotovoltaica mediante el reconocimiento de requisitos sociales y medioambientales, como el tratamiento de los módulos al final de su vida útil o la integración de la tecnología en el entorno.

Sin embargo, aún quedan muchos avances por realizar a escala nacional. Éstos se ven dificultados por los riesgos que plantea un modelo de negocio aún sin definir. Además, se prevé que el sector pueda sufrir un periodo de escasez de residuos una vez que finalice la repotenciación de las centrales fotovoltaicas de 2007-2008. Al mismo tiempo, los estudios prevén que para el año 2050, esta industria será capaz de recuperar alrededor del 75% de las materias primas necesarias para fabricar la demanda de módulos fotovoltaicos en España.

4.2 Negocio de reciclaje de energía eólica

Como se ha mencionado anteriormente en este informe, en el sector de la energía eólica existen diversos flujos y acciones a realizar una vez se decide el desmantelamiento o la prolongación de la vida útil de sus activos. Desde el punto de vista empresarial, existen dos planteamientos fundamentales a adoptar por la industria:

- a. El hormigón, los plásticos o incluso las palas generan materiales reciclados de bajo valor, por lo que, a menos que exista una normativa que prohíba el vertido, ésta será la solución más económica y sencilla para el sector. En la mayoría de los casos, la alternativa al vertedero es utilizar esos materiales como relleno para el sector de la construcción civil. En el caso particular de las palas, se están desarrollando diversas tecnologías que tratan de separar las fibras de las resinas. Si esto se logra a un coste razonable,

existe la posibilidad de reutilizar las fibras a través de nuevos tejidos, utilizar las resinas recuperadas como aditivos químicos para otros productos o quemarlas en el proceso de reciclaje para reducir el consumo de energía. Si no se obtiene ningún valor en la prolongación de la vida útil o en el proceso de reciclaje del componente, la industria optará por la solución más económica. En la actualidad, esta solución es el vertido de los residuos. Sólo en aquellos casos en los que exista una normativa que restrinja este método de eliminación, el sector buscará alternativas para hacerlos inertes al menor coste posible. Las palas pueden beneficiarse de dos fuentes de ingresos: la eliminación de las palas sin recurrir a los vertederos y la reintroducción de nuevos productos que utilicen fibras limpias (es decir, tejidos/compuestos de baja calidad para la industria de la construcción o incluso componentes de bajo valor para la industria del automóvil).

- b.** La mayoría de los componentes principales (engranajes, sistemas de accionamiento, generadores, cajas de cambios, etc.) tienen un mayor valor si se reacondicionan y se reintroducen en el mercado como piezas de recambio. Este mercado puede tener un valor extraordinario para las empresas manufactureras existentes, ya que cuentan con la capacidad y los conocimientos necesarios, y puede

La mayoría de los componentes principales (engranajes, sistemas de accionamiento, generadores, cajas de cambios, etc.) tienen un mayor valor si se reacondicionan y se reintroducen en el mercado como piezas de recambio

representar una excelente diversificación de su actividad actual que no requiere inversiones adicionales. Este último punto puede ser muy relevante, ya que el sector está evolucionando hacia maquinaria de mayor tamaño que requiere inversiones adicionales y es posible que ciertos proveedores actuales no quieran tomar esa senda. Si el componente o los materiales reciclados dentro del componente tienen suficiente valor, el mercado regulará los flujos económicos. En esta fase, el desmantelamiento puede pasar de ser un coste soportado por el propietario del activo a ser un coste soportado por la empresa que reacondiciona o recicla el componente. Las tecnologías que se utilicen estarán condicionadas por la capacidad de crear una brecha entre los costes de procesamiento y el valor de los productos derivados creados.

Un factor importante a evaluar es el tamaño del mercado en el futuro. Las instalaciones existentes son fáciles de evaluar, al igual que el momento en el que habrá que abordar las desinversiones. Sin embargo, a largo plazo es de gran relevancia estudiar en qué medida los cambios tecnológicos en el diseño y la fabricación de aerogeneradores afectarán al potencial del negocio.

Como ejemplo, VESTAS lidera una alianza entre la industria y el mundo académico para comercializar una tecnología de reciclaje de palas que utiliza termoplásticos en lugar de resinas termoestables. Esto puede reducir el potencial de mercado de las tecnologías descritas anteriormente (pirólisis, solvólisis, etc.). Al mismo tiempo, otras empresas están utilizando las palas de los aerogeneradores desmantelados como pesos para almacenar electricidad en el sistema de almacenamiento gravitacional de estos últimos, en una estrategia de reutilización.

4.3 Negocio de reciclaje de baterías

En cuanto a la industria del reciclaje de baterías, se prevé una tendencia a que los propietarios de los productos desempeñen un papel fundamental. Como hemos visto en el apartado sobre el mercado de las baterías, la palabra que mejor puede definir la situación del mercado para los próximos años es «escasez»: una demanda de baterías disparada, un tiempo de desarrollo de proyectos de nuevas materias primas de 7-10 años hasta el inicio de las operaciones, y una vida media de las baterías de 8-12 años (por lo que son muy pocas las que llegan al mercado del reciclaje en comparación con el número de baterías nuevas introducidas). Por otro lado, las materias primas pueden ser el cuello de botella de la cadena de suministro de las baterías de Li-Ion: la evolución de los precios del litio en los últimos 18 meses es el ejemplo perfecto. Los fabricantes de baterías y los fabricantes de equipos originales de automóviles (que serán los responsables del reciclaje de las baterías) serán también los principales «propietarios» de los modelos de negocio de reciclaje. Ya se aprecia una cierta tendencia en esta dirección (véase el siguiente gráfico).

Así pues, consideramos que, en lo que respecta a los compuestos químicos NMC, e impulsados por la escasez de níquel, cobalto y litio, los fabricantes de equipos originales de automóviles organizarán el reciclaje de sus baterías de forma que puedan recuperar los productos derivados para reintroducirlos en nuevas baterías de Li-Ion. Organizarán sus propios sistemas de recogida, utilizando para ello su red de venta al por menor o de posventa, y enviarán estos flujos de productos al final de su vida útil a operadores de reciclaje con los que hayan llegado a acuerdos de circuito cerrado. Es muy probable que estos operadores reclamen una participación en el capital de los fabricantes de equipos originales de automóviles para compensar la debilidad de su posición en un modelo de circuito cerrado, ya que

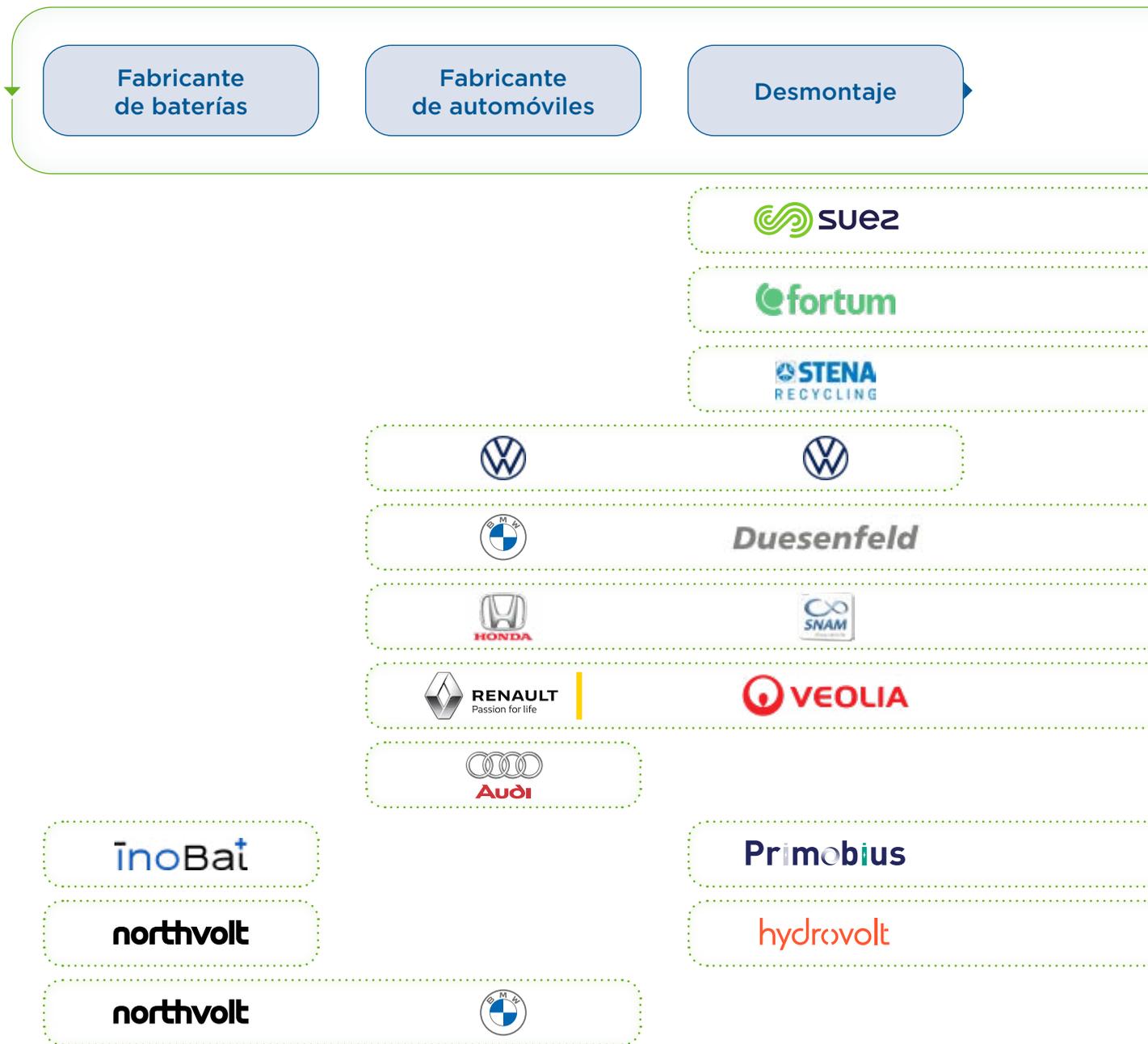


serán meros proveedores de servicios. Esta participación activa de los fabricantes de equipos originales de automóviles en el proceso de reciclaje mejorará el rendimiento del mismo: el diseño ecológico y la dosificación homogénea en los flujos de productos al final de su vida útil ayudarán a reducir los costes de todo el proceso mediante la automatización y una mayor eficiencia.

Esta estructuración del negocio de reciclaje de baterías con una participación tan alta de los fabricantes de equipos originales de automóviles es muy inusual. La gran escasez de materias primas motivará que estos no asuman únicamente una mera posición financiera. De hecho, las baterías son el nuevo corazón del coche eléctrico (y no el motor), por lo que los fabricantes de equipos originales de automóviles adoptarán medidas para ser estratégicamente fuertes en esta área, incluso tomando la delantera en el reciclaje e invirtiendo en la minería, algo que no hace mucho tiempo habría parecido inverosímil.

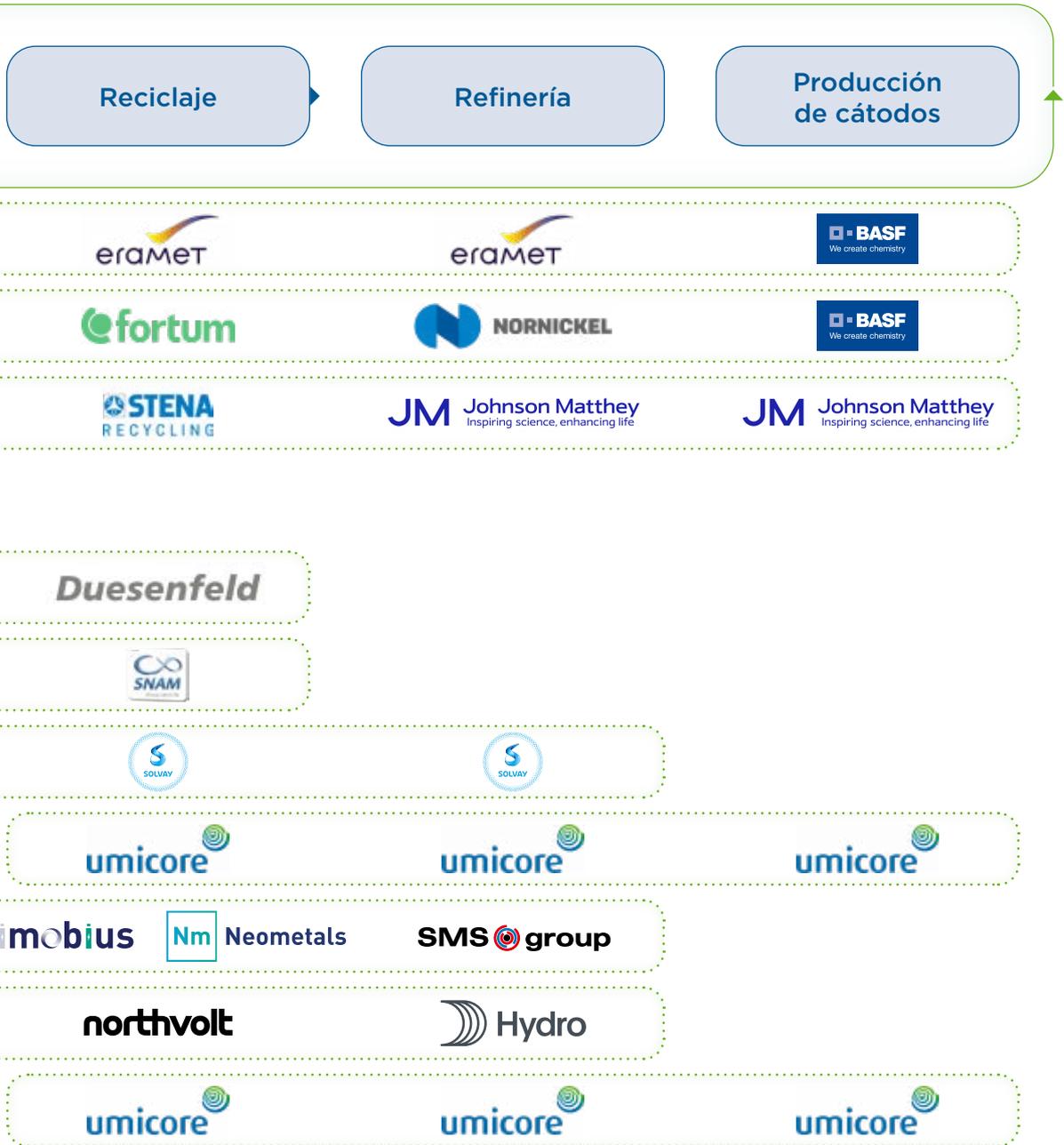
Gráfico 30.

Acuerdos de colaboración europeos relacionados con el reciclaje de baterías. Fuente: BloombergNEF.



Nota: La línea verde continua indica filiales conjuntas y operaciones internas. La línea discontinua refleja la cooperación estratégica.

Segunda vida. Si volvemos a los **gráficos 20 y 21 en los apartados 3.1 y 3.2** que mostraban la escasez de materias primas con respecto a la demanda, la pregunta que nos planteamos es: ¿Existirá un mercado para la segunda vida? La segunda vida tendrá su principal competidor en los fabricantes de equipos originales de automóviles que intenten hacerse con los valiosos metales de las celdas.



Si analizamos el mercado chino, donde van diez años por delante en el establecimiento de modelos de negocio de reciclaje, podemos ver que la segunda vida se centrará principalmente en las baterías LFP: además de ser menos valiosas para reciclar (sólo contienen litio, y en menor cantidad que las NMC) también son más adecuadas para el ciclado intensivo.

Conclusiones

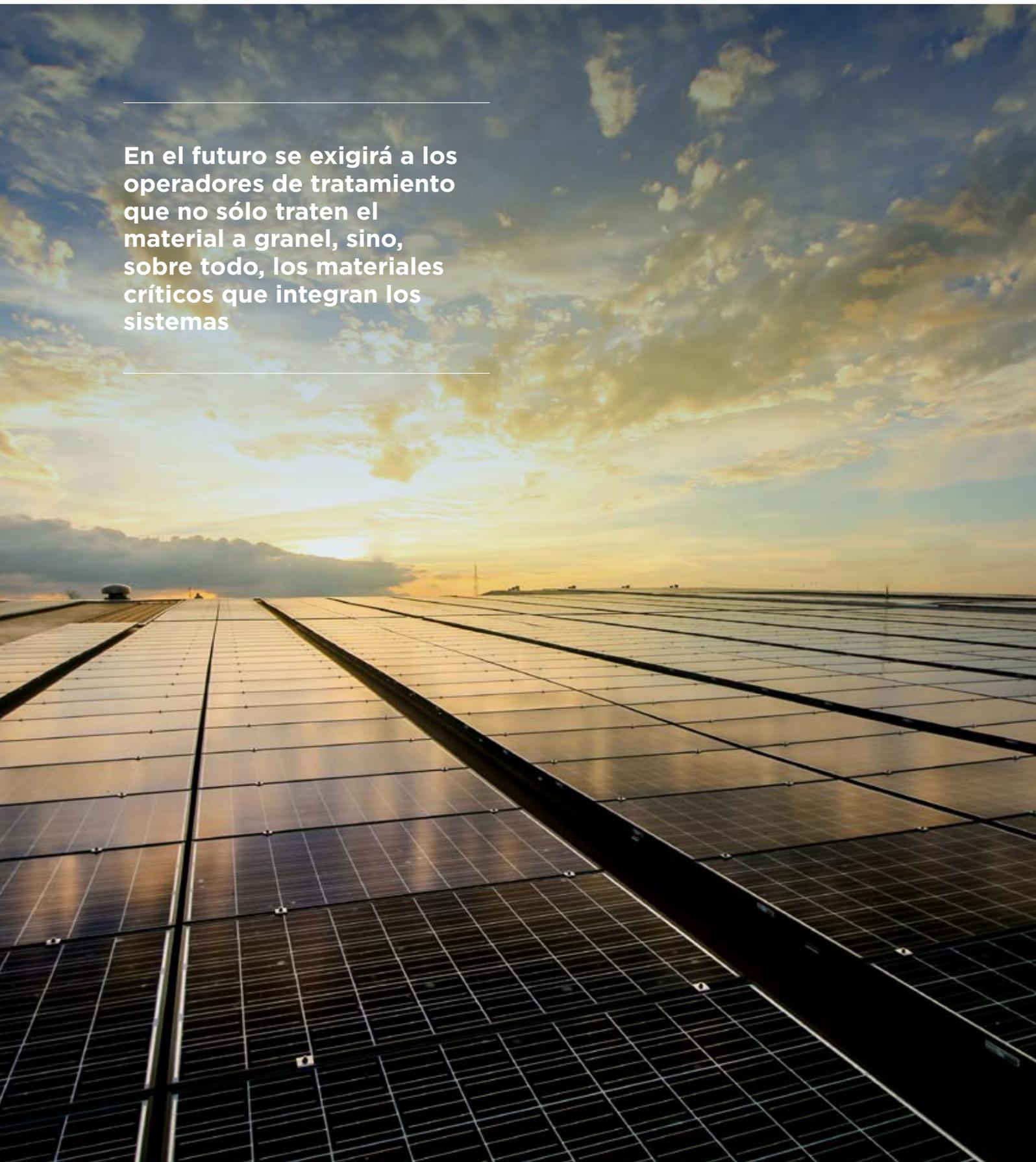
Como se explica a lo largo de este estudio, la transición energética no sólo requerirá una implantación generalizada de las fuentes de energía renovables, sino también una gestión eficaz del final de su vida útil para cumplir los objetivos de forma sostenible.

La economía de la UE depende en gran medida de la importación de numerosos minerales y metales necesarios para la industria energética. A día de hoy, mientras el 60% de la demanda mundial de materiales se extrae en China, Europa sigue dependiendo de las importaciones extranjeras para más del 80% de sus materias primas. Garantizar el acceso a un suministro estable de estas materias primas críticas se ha convertido en un gran reto para las economías nacionales y regionales. El impacto de la interrupción del suministro de materias primas podría significar una pérdida de actividad económica competitiva en la UE y, en algunos casos concretos, una menor disponibilidad de determinados productos finales estratégicos. Por este motivo, en la última década ha aumentado el interés por un uso eficiente de los recursos y un aumento de su tasa de recuperación.

Desde el punto de vista de la protección del medio ambiente y del clima, es importante que los módulos fotovoltaicos, los aerogeneradores y las baterías se utilicen durante el mayor tiempo posible y se reciclen al final de la vida útil del producto de forma que se conserven los recursos. Sin embargo, para ello es necesario mejorar las estructuras y directrices de mantenimiento correctivo, los ensayos funcionales, la recogida de residuos, el reciclaje y el diseño ecológico. Estas áreas de contribución no sólo reducirán el impacto en el medio ambiente al evitar millones de toneladas de residuos no gestionados, sino que también consolidarán a Europa como escenario de innovación. La correcta gestión del tratamiento de los residuos al final de su vida útil en el sector de las energías renovables ya se reconoce como un factor económico que se está acelerando a partir de la normativa específica de cada industria.

En la actualidad ya existen iniciativas de reciclaje en Europa con tasas de reciclaje relevantes superiores al 80% en términos de masa. Sin embargo, en el futuro se exigirá a los operadores de tratamiento que no sólo traten el material a granel, sino, sobre todo, los materiales críticos que

En el futuro se exigirá a los operadores de tratamiento que no sólo traten el material a granel, sino, sobre todo, los materiales críticos que integran los sistemas



En la actualidad, sigue existiendo una enorme brecha entre productores y operadores de reciclaje, que debe superarse para minimizar los modelos de producto y aplicar soluciones como el diseño ecológico y los materiales reciclados



integran los sistemas. Esto implicará muy probablemente un procesamiento adicional que vaya más allá de los tratamientos mecánicos, fomentando la aplicación de los requisitos mínimos de tratamiento y las especificaciones técnicas relacionadas para la descontaminación. Las directrices de contratación ecológica de los gobiernos a nivel estatal, regional y local deberían dar preferencia a los productos comparables

que utilicen materiales reciclados. A nivel de la UE, las especificaciones obligatorias de diseño ecológico, como facilitar la separación de los materiales, deberían aumentar la reciclabilidad de estas tecnologías sin limitar su vida útil. Asimismo, la implantación de plantas de reciclaje especializadas permitirá aumentar la capacidad de tratamiento de residuos y maximizar los ingresos, lo que también

se traducirá en una mayor calidad de la producción. Además, contribuirá a aumentar las tasas de recuperación de componentes valiosos.

Los mercados de reciclaje normalizados también deben superar las numerosas repercusiones administrativas en las tareas cotidianas y mejorar los niveles de calidad de los productos derivados más comunes para que sean aptos como insumos para su uso original. En la actualidad, sigue existiendo una enorme brecha entre productores y operadores de reciclaje, que debe superarse para minimizar los modelos de producto y aplicar soluciones como el diseño ecológico y los materiales reciclados. Cuanto más sólida sea la relación entre productores y operadores de reciclaje, mayor será la motivación y la implicación de los productores para conseguir modelos de reciclaje eficientes.

En un escenario ideal, los productores identificarían como propia la responsabilidad de la gestión del fin de vida de sus productos. Organizarían y financiarían sus propios sistemas colectivos de responsabilidad ampliada del productor para abordar el problema de la recogida, la clasificación y el reciclaje y, posteriormente, venderían los productos derivados a otras industrias. En realidad, aunque el sector está experimentando una transformación, a día de hoy los productores no asumen el reciclaje como parte de su negocio principal, hasta el punto de que incluso cuando el reciclaje genera beneficios, optan

Cuanto más sólida sea la relación entre productores y operadores de reciclaje, mayor será la motivación y la implicación de los productores para conseguir modelos de reciclaje eficiente

por no interferir en el mercado y que los operadores de reciclaje se beneficien de él sin abonar ni siquiera una prima.

Para 2035, el sector de las baterías necesitará recuperar el 30% del cobalto y el 20% del litio y el níquel de las baterías usadas, y para 2050 la implantación de los aerogeneradores requerirá la mayor parte de las tierras raras actualmente disponibles. Teniendo en cuenta esta futura escasez de materias primas en los próximos años, es evidente que esta estructura no puede perdurar demasiado tiempo. Con grandes porcentajes de recuperación de metales a partir de tecnologías de reciclaje, los productores querrán mantener un control sobre el flujo de sus productos al final de su vida útil, con el objetivo de recuperar las materias primas y reintroducirlas en sus líneas de producción. En el sector de las baterías, los fabricantes de equipos originales de automóviles (responsables de las baterías al final de su vida útil en el nuevo reglamento de la UE sobre baterías) invertirán directamente en plantas de reciclaje y organizarán la logística de sus propias baterías al final de su vida útil.

Los objetivos de la UE para la transición energética con bajas emisiones de carbono son claros, y el plan es alcanzarlos de forma sostenible, no sólo mediante el uso de tecnologías de energías renovables, sino también gestionando eficazmente los residuos generados por éstas. Satisfacer la demanda de materiales será el reto de Europa para lograr con éxito esta transición. Por ello, es importante continuar monitorizando los cambios en el suministro, el consumo y la criticidad de los materiales utilizados en el sector de las energías renovables. Es necesario realizar esfuerzos para garantizar un suministro estable y seguro de materiales específicos para esas tecnologías, con el fin de prevenir cualquier posible escasez futura. Para poder evaluar la capacidad de adaptación de la UE a estas crecientes demandas de materias primas, es necesario realizar estudios adicionales que analicen la evolución de los futuros suministros de materiales y los comparen con los resultados de la demanda de materiales presentados en este informe.

Referencias

• Baterías

- Conversations with Agustín Idareta, Business Development Manager of BeePlanet Factory (www.beeplanet.factorycom).
- Conversations and Support from the Management Team at the European Battery Alliance (www.eba250.com).
- Bloomberg. Lithium-Ion Battery Recycling Market Outlook, July 2021.
- Bloomberg. Battery Recycling Technology: A Primer. April 2021.
- Bloomberg. Lithium-Ion Battery Recycling Model (LiRyc 1.0., 2021).
- AEDIVE, Memoria 2020.
- Ecopilas, Memoria 2020.
- Sigrauto, Memoria 2020.
- IRENA (International Renewable Energy Agency), “Critical Materials for the Energy Transition”, Technical Paper 5/21.
- Boston Consulting Group, “The Case for a Circular Economy in Electric Vehicle Batteries”, September 2020.
- Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL concerning batteries and waste batteries, repealing Directive 2006/66EC and amending Regulation (EU) 2019/1020, from December 2020. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52020PC0798>.
- Hans Eric Melin, “The Lithium Ion Battery Life Cycle Report 2021”.
- Hydrometallurgical Processing of Li-Ion Battery Scrap from electric Vehicles”, Aachen 2011.
- Recycling of Lithium Ion Batteries, Aachen University, 2021.
- European Commission, JRC Science for Policy Report, Lithium Ion Battery Value Chain and Related Opportunities for Europe, 2018.
- Development of nano-composites for energy storage Devices, Md Ashiqur Rahaman Khan, December 2012. (como Fuente del gráfico del funcionamiento de una batería).
- www.ev-volumes.com (como fuente del gráfico primero de la sección de “The electric vehicle market”.
- “Lithium, Cobalt and Nickel: the Gold Rush of the 21st Century”, Faraday Institution, December 2020. Reference for the table on Metal Content per Battery Chemistry, in section 3.3.
- Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030. Ministerio para la Transición ecológica y el Reto Demográfico, Gobierno de España. Enero 2020.
- IEA, Global electric car sales by key markets, 2010-2020, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-electric-car-sales-by-key-markets-2015-2020>

- En base a las estimaciones de Eric Melin en el informe anual publicado en su web “Circular_Energy_Storage_Li_ion_battery_life_cycle_report_2021”,

• Energía eólica

- Bloomberg NEF data. 2022, www.bnef.com
- Getting fit for 55 and set for 2050 (2021), WINDEUROPE, www.windeurope.org
- NECPs by member state, European Commission, https://ec.europa.eu/info/energy-climate-change-environment/implementation-eu-countries/energy-and-climate-governance-and-reporting/national-energy-and-climate-plans_en
- Fit for 55, Council of the European Union, <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/green-deal/eu-plan-for-a-green-transition/>
- Net Zero Goals and Climate Neutrality, Council of the European Union, <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/HR-03-06-2020%20EU%20Submission%20on%20Long%20term%20strategy.pdf>
- European Green Deal, European Commission, https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en
- Wind turbine end-of-life: Characterisation of waste material, Niklas Andersen, Faculty of engineering and sustainable development, Department of Building, Energy and Environmental Engineering, 2015.
- Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system, JRC – European Commission, Carrara, S., Alves Dias, P., Plazzotta, B., Pavel, C., 2020.
- New EU Circular Economy Action Plan, European Commission 2020.
- Decommissioning of Wind Turbines – Industry Guidance Document, WINDEUROPE 2020, <https://>

windeurope.org/intelligence-platform/product/decommissioning-of-onshore-wind-turbines/

- Separation and Recycling Potential of Rare Earth Elements from Energy Systems: Feed and Economic Viability Review, Feb 2022, Ajay B. Patil et al.
- Waste Management of End-of-Service Wind Turbines, June 2015, Spyridoula Karavida, Reet Nõmmik, Siemens Wind Power, Aalborg University.

• Energía fotovoltaica

- https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Technical-Papers/IRENA_Critical_Materials_2021.pdf
- file:///C:/Users/TeresaGrijelmo/Downloads/CRMlist2020_FinalReport1.pdf
- <https://www.nature.com/articles/s41560-020-0645-2>
- file:///C:/Users/TeresaGrijelmo/Downloads/Critical%20Raw%20Materials%20in%20Technologies%20and%20Sectors_forestight.pdf
- <https://elpais.com/ciencia/2021-03-29/un-estudio-calcula-que-los-paneles-solares-generaran-80-millones-de-toneladas-de-residuos-en-tres-decadas.html>
- <http://www.solarwaste.eu/>
- <https://www.rosi-solar.com/>
- <https://www.livingcircular.veolia.com/en/industry/first-recycling-plant-europe-solar-panels>
- <https://elpais.com/economia/2020-10-11/paneles-solares-de-alto-rendimiento.html>
- <https://www.greenmatch.co.uk/blog/2015/09/types-of-solar-panels>
- <https://www.rosi-solar.com/photovoltaic-modules-recycling/>
- <https://www.youtube.com/watch?v=-qbMC5gms8w>
- <https://www.duh.de/projekte/pv-recycling/>

- <https://www.pv-magazine.es/2020/05/08/reciclaje-de-paneles-fotovoltaicos-estado-de-la-cuestion-y-perspectivas/>
- <https://www.globenewswire.com/news-release/2020/06/01/2041488/0/en/Silver-to-be-Critical-to-Solar-Power-Generation-Market-Over-Next-10-Years.html>
- file:///C:/Users/TeresaGrijelmo/Downloads/CRMlist2020_FinalReport1.pdf
- <https://seekingalpha.com/article/4491337-silver-is-worth-30-dollars-an-oz>
- <https://www.solarquotes.com.au/blog/critical-minerals-solar-batteries/>
- <https://cronkitenews.azpbs.org/2022/03/22/recycling-solar-panels-complicated-yuma-company-we-recycle-solar/>
- https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/annual_reports/fraunhofer-ise-annual-report-2020-2021.pdf
- https://www.researchgate.net/publication/46698024_Reduction_of_Environmental_Impacts_in_Crystalline_Silicon_Photovoltaic_Technology_An_Analysis_of_Driving_Forces_and_Opportunities
- https://cincodias.elpais.com/cincodias/2021/10/25/companias/1635178723_267417.html
- https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/End_of_Life_Management_of_Photovoltaic_Panels_Trends_in_PV_Module_Recycling_Technologies_by_task_12.pdf
- <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2020/ee/c9ee02452b>
- https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2021/04/IEA_PVPS_Snapshot_2021-V3.pdf
- http://www6.mityc.es/aplicaciones/transicionenergetica/informe_cexpertos_20180402_veditado.pdf
- https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jun/IRENA_Power_Generation_Costs_2019.pdf
- https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal/energy-and-green-deal_en
- <https://ratedpower.com/blog/pv-recycling/>
- https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Technical-Papers/IRENA_Critical_Materials_2021.pdf
- https://www.researchgate.net/publication/325566274_Projection_of_the_photovoltaic_waste_in_Spain_until_2050
- <https://pvcycle.org/services/>
- https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/Life_Cycle_Assesment_of_Current_Photovoltaic_Module_Recycling_by_Task_12.pdf
- <https://www.republica.com/internacional/la-guerra-del-litio-la-cara-b-de-la-invasion-rusa-a-ucrania-20220304-15011405500/>
- https://cincodias.elpais.com/cincodias/2021/10/25/companias/1635178723_267417.html
- <https://www.cityam.com/what-impact-is-greenflation-having-on-commodities/>
- <https://www.expansion.com/economia-sostenible/2022/03/24/623b6e14468ae676a8b4650.html>
- <https://www.eui.eu/news-hub?id=the-impact-of-the-war-in-ukraine-on-europes-climate-and-energy-policy>
- <https://energypost.eu/critical-raw-materials-for-the-energy-transition-europe-must-start-mining-again/>
- <https://www.euractiv.com/section/energy-environment/news/eu-raw-materials-push-aims-to-underpin-green-deal-digital-ambitions/>

- https://cincodias.elpais.com/cincodias/2021/10/25/companias/1635178723_267417.html
- <https://www.youtube.com/watch?v=1Lael9JSfVs>
- <https://www.pv-magazine.es/2020/10/05/la-columna-de-unef-el-reciclaje-de-paneles-fotovoltaicos-una-responsabilidad-ineludible/>
- https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/annual_reports/fraunhofer-ise-annual-report-2020-2021.pdf
- https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/End_of_Life_Management_of_Photovoltaic_Panels_Trends_in_PV_Module_Recycling_Technologies_by_task_12.pdf
- <https://elpais.com/ciencia/2021-03-29/un-estudio-calcula-que-los-paneles-solares-generaran-80-millones-de-toneladas-de-residuos-en-tres-decadas.html>
- <https://www.pv-magazine-australia.com/2022/03/17/sundrive-sets-26-07-efficiency-record-for-hjt-cell-in-mass-production-setting/>
- https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_1511

Reciclaje de eólica, fotovoltaica y baterías en Europa: una oportunidad para la recuperación de materias primas críticas

Fundación
Naturgy





Este libro se ha impreso utilizando papel libre de cloro de 300 gr. para la cubierta y de 150 gr. para el interior con certificación forestal PEFC de la Asociación Española para la Sostenibilidad Forestal.

