

Reciclaje de los nuevos sistemas energéticos: recuperación de metales críticos

Las tecnologías limpias como los vehículos eléctricos, paneles solares y aerogeneradores son fundamentales para la descarbonización, pero también dependen de materiales críticos con disponibilidad limitada y cadenas de suministro vulnerables. Su recuperación al final de vida fomenta una economía circular, reduce la presión sobre los recursos primarios y fortalece la autonomía estratégica. En este contexto, el reciclaje de metales críticos se perfila como una solución clave para hacer sostenible la transición energética.

Dolores Hidalgo

Directora del Área de Economía Circular, Fundación CARTIF

UNA NUEVA ERA DE RESIDUOS TECNOLÓGICOS

La transición energética ha desencadenado una transformación profunda en el sistema productivo global, intensificando la demanda de tecnologías como paneles solares, aerogeneradores y vehículos eléctricos. Estos sistemas, esenciales para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, han traído consigo un cambio estructural en los flujos de materiales. Se trata de tecnologías intensivas en metales críticos como litio, cobalto, níquel, neodimio o disprosio, cuya extracción se asocia a elevados impactos ambientales, alta concentración geográfica y riesgos geopolíticos.

Según la Agencia Internacional de la Energía, desde 2010 la cantidad de minerales requeridos por unidad de nueva capacidad energética se ha incrementado en más de un 50 %. Esta tendencia no es coyuntural: las previsiones apuntan a un crecimiento continuo hasta 2050, impulsado por la electrificación del transporte, el despliegue masivo de renovables y la digitalización. En este contexto, el reciclaje se configura como una vía estratégica para asegurar el suministro de materiales esenciales, reducir la dependencia de mercados externos y avanzar hacia una economía circular baja en carbono.

Pero si bien estos equipos son símbolos de progreso ambiental, también representan una nueva categoría de residuos tecnológicos complejos, voluminosos y de alto valor estratégico. Su proliferación introduce una transformación no solo en los patrones de consumo de materias primas, sino también en la forma en que se conciben y gestionan sus componentes al final de su vida útil. Los residuos de baterías, paneles solares y aerogeneradores, lejos de ser un pasivo, pueden convertirse en fuente secundaria de materias primas críticas, contribuyendo a

diversificar el abastecimiento y a mitigar los impactos ambientales de la minería primaria.

A diferencia de los residuos convencionales, los derivados de tecnologías energéticas limpias presentan una elevada densidad de valor acompañada de una gran heterogeneidad en su diseño, composición y localización geográfica. Por ejemplo, los módulos fotovoltaicos o los componentes de aerogeneradores pueden incorporar estructuras metálicas, materiales compuestos y sustancias potencialmente peligrosas como plomo, cadmio o fluoropolímeros, lo que exige tratamientos de separación específicos, técnicamente complejos y económicamente costosos. El reto reside, por tanto, en desarrollar cadenas de reciclaje eficientes, escalables y adaptadas a las particularidades de estos residuos emergentes.

METALES CRÍTICOS EN LAS TECNOLOGÍAS RENOVABLES

Cuando se habla de metales críticos, uno de los casos más conocidos es el de los vehículos eléctricos (VE). Su componente central, la batería de ion litio, contiene materiales como litio, cobalto, níquel, manganeso, aluminio y cobre. Se estima que una sola batería puede pesar más de 300 kg, de los cuales una fracción significativa corresponde a metales estratégicos. Bajo condiciones óptimas de reciclaje, se podrían recuperar entre el 50 % y el 60 % de estos materiales, reduciendo notablemente la necesidad de extracción primaria. Sin embargo, esto requiere infraestructuras especializadas, tecnologías maduras y una logística bien articulada, ya que el transporte y manipulación de baterías implica costes y requisitos normativos elevados. La razón de ello es que estos sistemas son considerados residuos peligrosos de Clase 9 porque



Imagen 1. Nuevos sistemas energéticos.

pueden representar riesgos como incendios, explosiones o liberación de sustancias peligrosas si no se manipulan correctamente. Un ejemplo reciente lo tenemos en el incendio ocurrido en la empresa de baterías de litio cerca de Guadalajara, que ha llevado al confinamiento de 60.000 personas.

El reciclaje eficiente de baterías también se enfrenta a barreras como la heterogeneidad en las composiciones químicas y la falta de estandarización en el diseño de los módulos, lo que dificulta la automatización del desmontaje y tratamiento. Proyectos europeos como Free4Lib (freeforlib.eu) están trabajando precisamente en esta línea: establecer rutas tecnológicas que permitan no solo recuperar los metales activos, sino también los componentes del electrolito y los materiales del separador, maximizando el aprovechamiento de los recursos y reduciendo residuos secundarios.

Por otro lado, los paneles fotovoltaicos (FV), especialmente los de silicio cristalino, tienen una vida útil estimada de 25 a 30 años. Aunque su composición incluye un alto porcentaje de vidrio, también contienen silicio de alta pureza, plata, aluminio y cobre. Tecnologías que combinen tratamientos mecánicos, térmicos y químicos, permiten recuperar prácticamente la totalidad de los materiales de valor, incluyendo el silicio en condiciones aptas para su reutilización. El reto, sin embargo, no reside tanto en la viabilidad técnica como en la disponibilidad de plantas, la rentabilidad económica y el volumen aún incipiente de residuos generados.

En el caso de los paneles solares, los procesos de reciclaje existentes han demostrado ser técnicamente viables para el tratamiento de módulos de silicio cristalino, pero aún no son aplicables a tecnologías emergentes como los paneles de perovskita o CdTe, que presentan otros desafíos técnicos y ambientales. Además, el bajo valor económico de algunos componentes (como el vidrio) hace que la rentabilidad del proceso dependa críticamente de la recuperación eficiente de metales como la plata o el silicio ultrapuro.

En el ámbito de la energía eólica, los aerogeneradores modernos emplean imanes permanentes de neodimio-hierro-boro (NdFeB), que incorporan elementos de tierras raras como neodimio, disprosio y praseodimio. Estos materiales no tienen sustitutos funcionales directos, y su extracción está sujeta a impactos ambientales severos y a una cadena de suministro fuertemente dominada por China. Aunque el reciclaje de tierras raras se encuentra todavía en fase piloto, diversas iniciativas europeas están avanzando en rutas tecnológicas capaces de recuperar estos elementos con alta pureza. Su escalado industrial, sin embargo, exige inversiones significativas y una integración efectiva con las redes logísticas de gestión de residuos.

Respecto a los aerogeneradores, otro aspecto relevante es el tratamiento de las palas, fabricadas en su mayoría con materiales compuestos de fibra de vidrio o carbono y resinas termoestables. Aunque no contienen metales críticos, representan una fracción importante del volumen

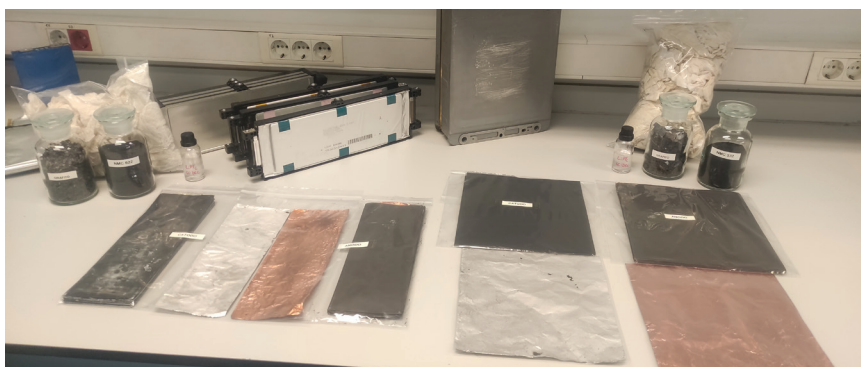


Imagen 2. Reciclado de baterías de VE en proyecto Free4Lib. Fuente: CARTIF

total de residuos y requieren tecnologías avanzadas como la pirolisis, el solvolisis o el reciclaje mecánico de alta energía para evitar su deposición en vertedero. La gestión integral de un aerogenerador al final de su vida útil exige, por tanto, un enfoque multitecnológico que combine soluciones para componentes metálicos, electrónicos y poliméricos, como bien se ha demostrado en el proyecto REFIBRE (liferefibre.eu).

DESAFÍOS ESTRUCTURALES DEL RECICLAJE DE METALES CRÍTICOS

A pesar del potencial técnico y estratégico del reciclaje de materiales críticos, las limitaciones actuales no son menores. Por un lado, muchas de las tecnologías disponibles están aún en fase experimental o de planta piloto, y sus costes de operación, especialmente en el caso de los imanes y las baterías, siguen siendo elevados. Por otro lado, la infraestructura existente no está preparada para absorber el volumen creciente de residuos previsto en las próximas décadas.

Un estudio aplicado al caso de Italia, que puede replicar bien la situación en España por la similitud climática entre ambos países, proyecta que los residuos de baterías pasarán de 6.700 toneladas en 2025 a 18.000 en 2031, mientras que los paneles solares generarán más de 300.000 toneladas anuales al final de su vida útil. Esta avalancha de residuos requiere una expansión significativa de la capacidad instalada, así como una planificación territorial inteligente. Además, la distribución geográfica de los residuos no es homogénea: mientras que las baterías tienden a concentrarse en regiones urbanas, los residuos de aerogeneradores y fotovoltaica predominan en zonas rurales y en las islas.

Este desequilibrio territorial obliga a replantear la localización y el tamaño de las plantas de reciclaje. Las soluciones centralizadas, aunque más eficientes a gran escala, pueden resultar ineficaces si no se cuenta con una red logística adecuada. Además del reto tecnológico, existe una carencia estructural en materia de gobernanza y planificación a largo plazo. Muchos países carecen de

registros actualizados sobre la localización, volumen y tipología de residuos energéticos generados o previstos, lo que dificulta la toma de decisiones sobre inversiones en plantas de reciclaje. Asimismo, la falta de una taxonomía armonizada para clasificar estos residuos a nivel europeo impide el desarrollo de cadenas logísticas transfronterizas más eficientes.

A ello se suma la necesidad de formar nuevos perfiles profesionales capaces de operar y mantener los equipos avanzados de reciclaje, especialmente en tecnologías emergentes como la recuperación selectiva de tierras raras. La generación de conocimiento aplicado, la capacitación técnica y la digitalización de los procesos son elementos clave para superar la brecha entre el desarrollo científico y su implantación industrial.

HACIA CADENAS LOGÍSTICAS EFICIENTES Y RESILIENTES

Para abordar estas complejidades, se están desarrollando modelos de planificación basados en programación matemática, capaces de integrar variables espaciales, temporales y económicas. Uno de los enfoques más robustos es el uso de modelos de programación lineal entera-mixta (MILP), que permiten optimizar simultáneamente la ubicación de plantas, la asignación de flujos de residuos y el modo de transporte más adecuado (camión, ferrocarril, barco).

La aplicación de un modelo MILP bajo escenarios prospectivos de demanda muestra que, hasta 2031, los costes anuales de reciclaje podrían duplicarse, alcanzando los 250 millones de euros. El componente de mayor peso es el reciclaje de baterías, debido a sus altos costes de tratamiento y transporte. No obstante, el modelo demuestra que el ferrocarril ofrece ventajas económicas claras frente al transporte por carretera, especialmente cuando se manejan grandes volúmenes. En regiones insulares o con infraestructuras ferroviarias limitadas, el transporte marítimo resulta fundamental para conectar con las plantas del continente.



Imagen 3. Reciclado de palas de aerogenerador en proyecto REFIBRE. Fuente: CARTIF.



Este tipo de modelos también permite evaluar escenarios de incertidumbre. Por ejemplo, una duplicación en la generación de residuos implicaría un incremento del 99 % en los costes totales hacia 2050, pero permitiría alcanzar economías de escala en las plantas, reduciendo los costes unitarios de tratamiento. Por el contrario, si el volumen de residuos fuera la mitad de lo esperado, los costes específicos aumentarían significativamente, debido a la pérdida de eficiencia operativa. Esta sensibilidad subraya la importancia de diseñar redes flexibles, escalables y adaptadas al contexto territorial.

Una de las principales conclusiones de estudios recientes es que el coste total de la red de reciclaje no se distribuye de forma homogénea entre tecnologías. En escenarios de transición rápida (como el denominado de cero emisiones netas), el reciclaje de baterías representa el 62 % del coste total, seguido por los módulos fotovoltaicos (26 %) y los aerogeneradores (12 %). Esta distribución responde tanto al volumen de residuos generados como al coste específico de cada proceso de reciclaje. La implicación directa es que cualquier estrategia de optimización debe priorizar la eficiencia logística del tratamiento de baterías, especialmente en zonas con alta densidad urbana o industrial.

También resulta clave considerar la estacionalidad en la generación de residuos, derivada del ritmo de sustitución tecnológica y de políticas de incentivación. Por ejemplo, las campañas de renovación de parques solares o flotas de vehículos eléctricos pueden generar picos de residuos en determinados meses, lo que exige una capacidad de absorción flexible por parte de las plantas de reciclaje. Modelos dinámicos de optimización pueden incluir estos factores temporales y ayudar a prever cuellos de botella, facilitando una mejor asignación de recursos.

EL RECICLAJE COMO ESTRATEGIA INDUSTRIAL Y GEOPOLÍTICA

Más allá de su impacto ambiental, el reciclaje de metales críticos tiene implicaciones directas en la seguridad industrial y la soberanía tecnológica de Europa. Las proyecciones más optimistas indican que, para 2050, el reciclaje podría cubrir más del 70 % del cobalto y el níquel requeridos por la industria de baterías, hasta un 60 % del litio y entre el 30 % y el 50 % de las tierras raras empleadas en imanes. También se recuperarían grandes cantidades de silicio, cobre y aluminio, esenciales para la fabricación de nuevos equipos energéticos.

Esto convierte al reciclaje en una fuente secundaria de materias primas que puede reducir la exposición de la Unión Europea a mercados inestables o políticamen-

te sensibles. No en vano, el nuevo Reglamento europeo sobre Materias Primas Críticas incluye objetivos explícitos para incrementar la capacidad de reciclaje interna, fomentar el eco-diseño y promover sistemas de trazabilidad de materiales. Estas políticas deben ir acompañadas de incentivos económicos, esquemas de responsabilidad ampliada del productor, y una coordinación transnacional que evite la fragmentación del mercado.

La dependencia europea de importaciones en ciertos materiales supera el 90 %, especialmente en el caso del cobalto, el litio y las tierras raras. El reciclaje, en este sentido, no solo refuerza la autonomía estratégica, sino que también actúa como mecanismo de estabilización frente a la volatilidad de los precios internacionales. Por ejemplo, durante la pandemia de COVID-19 y en el contexto del conflicto en Ucrania, los precios del litio y del níquel experimentaron subidas abruptas que afectaron directamente a la cadena de suministro de baterías. Disponer de recursos reciclados permitiría amortiguar estos impactos y mejorar la resiliencia del tejido industrial europeo.

Otra dimensión estratégica reside en la creación de empleo verde. El despliegue de infraestructuras de reciclaje descentralizadas y especializadas puede dinamizar economías locales, generar empleo cualificado y reforzar cadenas de valor industriales regionales. Además, al tratarse de actividades intensivas en conocimiento y tecnología, pueden convertirse en un motor de innovación y transferencia tecnológica.

CONCLUSIÓN: CERRAR EL CÍRCULO PARA ABRIR EL FUTURO

Lo que está claro es que la transición energética no será verdaderamente sostenible si no se acompaña de una transformación profunda en la gestión de los materiales que la sostienen. El reciclaje de metales críticos no es solo una opción ambiental, es una palanca estratégica para reforzar la autonomía industrial, reducir la huella ecológica y construir un modelo de desarrollo resiliente. Convertir el final de vida de una batería, un panel solar o un aerogenerador en el principio de un nuevo ciclo productivo requiere visión, planificación e inversión.

Nos encontramos en un punto de inflexión. Si se adoptan las decisiones correctas hoy, desde la regulación hasta la inversión en innovación, Europa puede liderar la construcción de un sistema energético verdaderamente circular. Un sistema en el que los residuos tecnológicos de hoy se conviertan en los recursos estratégicos del mañana.

