

ENTREGABLE 2.2

PROYECTOS—

2024-2025

Sostenibilidad en la recuperación de tierras raras contenidas en imanes permanentes “SOSTIRARE”

Entregable: E2.2. Informe publicable de resultados.

Programa: Proyectos de I+D en colaboración con empresas

Número de proyecto: 22400052

Expediente: IMDEEA/2024/71

Duración: 06/2024 – 10/2025

Coordinado en AIDIMME por: Grima Carmena, Laura

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	1
1.1. EMPRESAS COLABORADORAS.....	2
1.1.1. EMPRESA 1: JOSÉ JAREÑO, S.A.....	2
1.1.2. EMPRESA 2: FACSA S.A.....	2
1.1.3. EMPRESA 3: ACONDAQUA S.L.....	3
1.1.4. EMPRESA 4: COLORNOU S.A.	3
1.1.5. EMPRESA 5: AL FARBEN, S.A.	4
1.1.6. ESQUEMA-RESUMEN EMPRESAS.....	5
2. ACTIVIDADES REALIZADAS, DESARROLLO DEL PROYECTO	6
2.1. ELECTRO-LIXIVIACIÓN DE IMANES PERMANENTES (PAQUETE DE TRABAJO 4)	6
2.1.1. TAREA 4.1. ANÁLISIS, IDENTIFICACIÓN Y DISEÑO DE LAS CONDICIONES PARA LA ELECTRO-LIXIVIACIÓN 7	
2.1.2. TAREA 4.2. LIXIVIACIÓN ELECTRO-ASISTIDA DE METALES VALIOSOS	7
2.1.3. TAREA 4.3. VALIDACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE ELECTRO-LIXIVIACIÓN	10
CONCLUSIONES PT4.....	12
2.2. PURIFICACIÓN Y RECUPERACIÓN DE LOS RECURSOS PRESENTES EN LAS CORRIENTES PROCEDENTES DE LA ELECTRO-LIXIVIACIÓN (PAQUETE DE TRABAJO 5).	14
2.2.1. TAREA 5.1 CORRIENTES RICAS EN HIERRO, PROCEDENTES DE LA ELECTRO-LIXIVIACIÓN	15
2.2.2. TAREA 5.2 CORRIENTES RICAS EN RICAS EN REÉS Y OTROS METALES, PROCEDENTES DE LA ELECTRO-LIXIVIACIÓN.....	18
2.2.3. RESULTADOS DE RECUPERACIÓN.....	22
2.3. PROCESO PARA LA VALORIZACIÓN DE LOS PMS Y ESTUDIO TÉCNICO-ECONÓMICO DE LA TECNOLOGÍA (PAQUETE DE TRABAJO 6)	1
2.3.1. TAREA 6.1. PROPUESTA DE PROCESO Y ESTUDIO TÉCNICO ECONÓMICO.....	1
3. CONCLUSIONES	1
4. BIBLIOGRAFÍA.....	2

1. Introducción, objetivos del proyecto

Las **REEs** son elementos con propiedades únicas que resultan esenciales para la fabricación de una amplia gama de tecnologías, destacando aquellas relacionadas con la **energía sostenible**. El neodimio y el disprosio se utilizan en la fabricación de **imanes permanentes** (PMs) de alta eficiencia, cruciales para la construcción de turbinas eólicas, motores de vehículos eléctricos, dispositivos electrónicos, catalizadores, discos duros... Los imanes de **neodimio** (NdFeB) además pueden contener otros elementos de interés para mejorar sus propiedades tales como el boro, cobalto etc.

La **disponibilidad** y el suministro estable de las REES se consideran fundamentales para el desarrollo y expansión de las energías renovables y la transición hacia una economía más limpia y sostenible. Actualmente, estos materiales se obtienen exclusivamente de países externos a la unión europea. La actual demanda en las energías renovables apunta a la generación en medio plazo de una gran cantidad de residuos de imanes cuyos componentes de mayor valor añadido son las REEs. Debido a su **importancia económica y ambiental**, especialmente por la escasez, coste de purificación y la concentración geográfica de las explotaciones, resulta clave considerar el reciclaje y la obtención de estos elementos a partir de residuos, que minimice la gran dependencia de terceros países para su suministro.

Las **tecnologías actuales de reciclaje** se basan en procesos pirometalúrgicos (fundición a altas temperaturas y posterior separación) e hidrometalúrgicos (disolución en ácidos concentrados en distintas condiciones de concentración y temperatura), con un alto impacto ambiental. Es por ello, que se considera primordial el desarrollo de **procesos de recuperación de bajo impacto y alto rendimiento** que reduzcan la generación de nuevos residuos y el consumo de energía y recursos fósiles.

SOSTIRARE tiene como objetivo el desarrollo de un **proceso electro-hidrometalúrgico** para la recuperación de **REEs y otros elementos de valor añadido**, donde adicionalmente se valorizarán **salmueras** (residuos de sectores diferentes) empleándolas como **electrolitos sostenibles** en línea con los principios de la **economía circular y simbiosis industrial**. De esta manera, se busca la recuperación de materias primas críticas de alto valor añadido, contribuyendo a la diversificación de la cadena de suministro y la reducción del impacto ambiental asociado a la recuperación de residuos y contribución al desarrollo de las energías limpias.

El objetivo principal del proyecto consiste en la **recuperación de las tierras raras (REEs)** de alto valor añadido, procedentes de residuos, mediante un **proceso de bajo impacto ambiental**, que aplica una estrategia basada en la simbiosis industrial y tecnologías electroquímicas

1.1. Empresas colaboradoras

Las empresas que han colaborado en el proyecto son:

- JOSÉ JAREÑO
- FACSA
- ACONDAQUA
- AL FARBEN
- GRUPO DE NEGOCIOS PO (TOPCIMENT)

Adicionalmente, la empresa siguiente ha colaborado sin tener declaración previa, ya que estaba interesada en proporcionar las salmueras con las que realizar el proceso electrolítico:

- COLORNOU

1.1.1. Empresa 1: JOSÉ JAREÑO, S.A.

Empresa dedicada al reciclaje de chatarra y todo tipo de metales, incluyendo el desguace de vehículos y la gestión de residuos de desmontaje de instalaciones. Se encuentran en proceso de mejora continua, actualmente instalando una planta de desfragmentación, triturado y segregación de los componentes metálicos de los distintos residuos. Disponen de una línea especializada para residuos de aparatos eléctricos y electrónicos para el tratamiento de todas las fracciones, peligrosas y no peligrosas, con los principales sistemas integrados de gestión; equipos de refrigeración, equipos informáticos y telecomunicaciones, paneles solares etc. en cuya composición se encuentran imanes permanentes de potencial interés para SOSTIRARE.

Su colaboración en el proyecto se ha enmarcado en las siguientes tareas:

- 4. Electro-lixiviación de imanes permanentes. Ha proporcionado los residuos que contienen imanes permanentes (discos duros) para ser tratados durante el proyecto. Les ha realizado un pretratamiento en el cual han eliminado el circuito impreso que llevan anexo.
- 6. Evaluación de la viabilidad de implantación de los resultados en la empres

1.1.2. Empresa 2: FACSA S.A.

Empresa perteneciente al Grupo Gimeno que fue fundada en Castellón en el año 1873 con el objetivo de dotar a la capital de una moderna red de distribución de agua potable. Realizan la depuración y regeneración de aguas residuales con el objetivo de prevenir la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas y proteger el medio ambiente. Son pioneros en la implantación de tecnologías de tratamiento como desaladoras, potabilizadoras, tecnología de membranas, equipos de cloración y eliminación de contaminantes.

Su colaboración en el proyecto se ha enmarcado en las siguientes tareas:

- 4. Electro-lixiviación de imanes permanentes. La empresa de tratamiento de aguas, ha proporcionado salmueras, la fracción concentrada de un proceso de osmosis, que se han empleado como electrolito en las distintas electrolixiviaciones de los imanes permanentes
- 6. Evaluación de la viabilidad de implantación de los resultados en la empresa

1.1.3. Empresa 3: ACONDAQUA S.L.

Acondaqua es una empresa con más de 10 años de experiencia que trabaja en el sector del tratamiento de vertidos tanto urbanos como industriales y en el acondicionamiento del agua de consumo a nivel doméstico e industrial. Ofrecen el servicio de diseño, instalación, puesta en marcha y mantenimiento de su depuradora. Con respecto a los vertidos industriales, se ofrece el servicio de diagnóstico in situ mediante una Unidad Móvil con el objetivo de diseñar a medida la depuradora para garantizar siempre el cumplimiento de los parámetros exigidos por la entidad competente.

Su colaboración en el proyecto se ha enmarcado en las siguientes tareas:

- 4. Electro-lixiviación de imanes permanentes. Empresa enfocada en el tratamiento de aguas, que ha proporcionado las salmueras (industriales) que se emplearán como electrolito en las distintas electrolixiviaciones de los PMs
- 6. Evaluación de la viabilidad de implantación de los resultados en la empresa

1.1.4. Empresa 4: COLORNOU S.A.

Colornou, S.A., es una empresa dedicada a la gestión integral de la tintura de hilados, que ofrece sus servicios desde mayo de 1989. Cuentan con una sección de bobinados destinada a la preparación de ovillos de hilo y optimizadas. La empresa se encuentra en el puerto de Sagunto, y dispone de líneas de servicio que comprenden la tintura tanto de fibras naturales (seda, algodón, lino, etc.); como artificiales (poliéster, acrílicas, poliamidas, etc.; como hilados técnicos, y por supuesto, sus mezclas. Disponiendo también, en su caso, de las diferentes calidades aplicables de tintura. Posteriormente, en las secciones de enconado se aplican condiciones, como el metrado, parafinado, etc., adaptando los pedidos a las necesidades del cliente mediante un servicio integral realizado totalmente en sus instalaciones.

Su colaboración en el proyecto se ha enmarcado en las siguientes tareas:

- 4. Electro-lixiviación de imanes permanentes. Empresa de tintura de hilos, las cuales generan residuos concentrados, han proporcionado salmueras procedentes de su proceso productivo que se han empleado como electrolito en las distintas electrolixiviaciones de los PMs.

- 6. Evaluación de la viabilidad de implantación de los resultados en la empresa

1.1.5. Empresa 5: AL FARBEN, S.A.

Al-Farben, empresa fundada en 1980 y perteneciente al Grupo Torrecid, está situada en Alcora (Castellón, España) y es una de las mayores compañías del mundo en la fabricación de colores y pigmentos inorgánicos para diversos sectores: cerámica, vidrio, plásticos, pinturas y materiales de construcción.

El Grupo tiene instalaciones de producción y oficinas de ventas/marketing en 28 países de Europa, Asia, América y Oriente Medio-África, lo que nos les permite responder de manera rápida y eficiente a las necesidades específicas de los clientes en más de 130 países, así como aprovechar las sinergias de nuestro su profundo conocimiento del mercado internacional. La misión de Al-Farben es: «Provocar el cambio mediante el liderazgo mundial en innovación para generar nuevas soluciones y tendencias de futuro que proporcionen las mejores ventajas competitivas y el mayor valor añadido». Durante el proyecto se espera obtener una corriente rica en REEs que puede ser susceptible de valorización por A-IFarben, que evaluará las características de las REEs obtenidas tras la electrolixiviación de PMs, con el fin de determinar si cumplen con sus parámetros de calidad. Se estudiará la posibilidad de incorporar las REEs obtenidas en alguna de sus formulaciones.

Su colaboración en el proyecto se ha enmarcado en las siguientes tareas:

- 5.2. Testeo de óxidos de tierras raras para la formulación y evaluación de pigmento inorgánico para incorporar en esmaltes cerámicos.
- 6. Evaluación de la viabilidad de implantación de los resultados en la empresa

1.1.6. Esquema-resumen empresas

EMIPRESA	JOSÉ JAREÑO	FACSA	ACONDAQUA	TOPCIMENT	ALFARBEN
DESCRIPCIÓN	Empresa dedicada al reciclaje de chatarra y todo tipo de metales.	Empresa perteneciente al Grupo Gimeno, realizan depuración y regeneración de aguas residuales. Implantación de tecnologías de membranas etc.	Sector del tratamiento de vertidos tanto urbanos como industriales.	Fabrican y comercializan recubrimientos innovadores y duraderos para interiores y exteriores.	Perteneciente al grupo Torrecid, dedicados a la fabricación de pigmentos inorgánicos para diversos sectores: cerámico, vidrio, plásticos, pinturas....
COLABORACIÓN EN EL PROYECTO	Proporcionarán material para las pruebas de electrolisis.	Proporcionarán salmueras para ser empleadas como electrolitos.	Proporcionarán salmueras procedentes de los equipos de osmosis.	Incluir el hierro recuperado para la pigmentación del microcemento.	Incluir las REEs recuperadas en las formulaciones de pigmentos.
PAQUETE DE TRABAJO	4 6	4 6	4 6	5 6	5 6

Ilustración 1. Resumen de la descripción, colaboración y paquete de trabajo en el que participan las empresas en SOSTIRARE

2. Actividades realizadas, desarrollo del proyecto

En el presente apartado se describen de forma estructurada y detallada las actividades desarrolladas en los distintos paquetes de trabajo que conforman el proyecto SOSTIRARE, orientado al diseño y validación de un proceso sostenible y de bajo impacto ambiental para la recuperación de tierras raras a partir de imanes permanentes.

La ejecución del proyecto se ha organizado en varios paquetes de trabajo interrelacionados, donde abarcan desde la gestión y coordinación general hasta el desarrollo técnico del proceso de electro-lixiviación, la purificación de recursos recuperados y el análisis técnico-económico de la tecnología propuesta. En paralelo a todos los PT del proyecto, se ha realizado la difusión de los avances y resultados obtenidos en distintos medios de interés. Se puede acceder a las noticias publicadas en medios internos a través del siguiente enlace: <https://actualidad.aidimme.es/tag/sostirare/>

2.1. Electro-lixiviación de imanes permanentes (PAQUETE DE TRABAJO 4)

Este PT tiene como objetivo el diseño de las condiciones para la electro-lixiviación, la ejecución de los ensayos y la optimización de los parámetros para conseguir la disolución de los lantánidos contenidos en los imanes permanentes (PMs).

Para ello, se desglosa el paquete en objetivos parciales:

- El análisis, identificación y diseño de las condiciones para la electro-lixiviación;
- La lixiviación electro-asistida de metales valiosos;
- La validación y optimización del proceso de electro-lixiviación.

Se han estudiado distintos residuos de salmueras, incorporándolos al proceso para su revalorización. Los **elementos de REEs** son de gran importancia en la industria actual para producir materiales necesarios en numerosas tecnologías, entre ellos los PMs utilizados en los generadores eólicos y dispositivos electrónicos (discos duros, altavoces etc.). Se consideran **materias primas críticas** debido a la gran demanda y escasez de suministro en la unión europea, a su vez que altamente estratégicas y relevantes para la inversión en las energías renovables. Actualmente se importan de terceros países mediante procesos de extracción altamente contaminantes y no existen alternativas sostenibles para la recuperación de las REEs a partir de residuos.

Por otro lado, las **salmueras** son un residuo procedente de tratamientos de osmosis inversa o intercambio iónico, tanto de desalinizadoras como de procesos industriales, en los cuales se genera un vertido altamente salino cuya gestión habitual es la inyección en acuíferos o vertido directo al mar, con los inconvenientes que esto conlleva.

2.1.1. Tarea 4.1. Análisis, identificación y diseño de las condiciones para la electrolixiviación

Se han realizado análisis, tanto internos como externos para caracterizar las muestras de PMs y de salmueras con las que se ha trabajado a lo largo del proyecto. Las técnicas de caracterización han sido las siguientes:

- Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS)
- Análisis por fluorescencia de rayos X (FRX)

Se han buscado elementos como el Fe, Nd, Dy, Pr, Ni, B, Co de manera principal, y de forma secundaria otros metales como el Cu, Ni, Zn, y la presencia de cloruros y otras posibles impurezas que puedan contener. Se han analizado:

- Salmueras de osmosis
- Salmueras industriales en base cloruros
- Salmueras industriales en base sulfatos
- Imanes permanentes procedentes de aerogenerador
- Imanes permanentes procedentes de discos duros

El rango de valores se aporta en el esquema general incluido en las conclusiones de este PT.

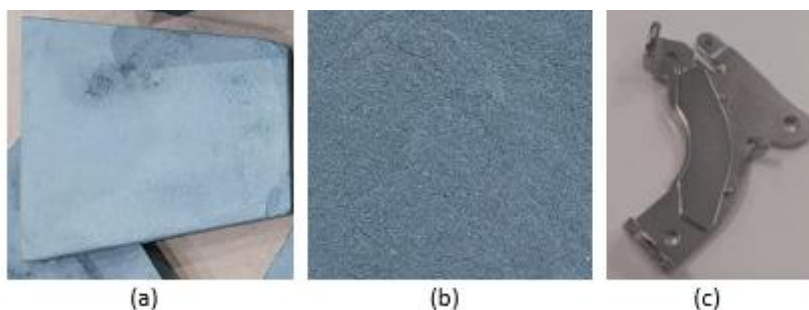


Ilustración 2. Fotos de los imanes permanentes: (a) imán procedente de aerogenerador (b) mismo imán de aerogenerador triturado formato pulverulento y (c) imán de disco duro directamente del residuo.

2.1.2. Tarea 4.2. Lixiviación electro-asistida de metales valiosos

A lo largo esta tarea han tenido lugar los ensayos de electrolixiviación de los PMs mediante tecnologías de electrólisis. Se realizan los ensayos en función a los parámetros y configuraciones definidas en la subtarea anterior, con respecto a;

- Electrolixiviación directa/indirecta

Se han realizado ensayos con contacto directo del imán con los electrodos para los imanes de discos duro y las piezas procedentes de aerogenerador así como indirecto (mediante la generación in situ de lixiviante que se recircula a través del sistema) para el formato pulverulento.

- Tiempo de operación óptimo

Para establecer un tiempo de operación óptimo debe haber un compromiso entre el rendimiento total de extracción y un tiempo de operación razonable para evitar costes de operación excesivos.

- Electrolito con/sin recirculación

La recirculación del electrolito es necesario para maximizar el contacto del residuo con el agente lixiviante. Esto ha dependido del formato del residuo; si bien inicialmente se consideraba suficiente una homogeneización mediante agitación magnética, en el caso del material pulverulento esto no es viable puesto que se queda adherido al imán e impide su funcionamiento. Por ello, se incluyen agitadores mecánicos y recirculaciones.

- Variación de la naturaleza y concentración de los electrolitos. Determinación de los posibles precipitados y subproductos del proceso

Durante los ensayos se ha realizado un muestreo que permite caracterizar la composición del electrolito y la cantidad de elementos disueltos. Asimismo, se ha llevado una monitorización y control sobre los parámetros tales como pH, conductividad, temperatura...

- Determinación del rendimiento de extracción

Tanto durante como al final de los ensayos, se han analizado las muestras tomadas en cada instante de tiempo determinado para medir la concentración, y evaluar así el incremento de concentración de los metales en la disolución. Para calcular el rendimiento de extracción, se ha comparado el valor del metal disuelto con respecto al teórico. El contenido teórico corresponde a la caracterización de los imanes permanentes de la tarea 4.1.1.

El protocolo de trabajo a seguir para la preparación de cada ensayo fue el siguiente:

- Preparación de las disoluciones: Anolito, Catolito, compartimento medio
- Calibración de sondas (pH-T, conductividad)
- Monitorización de los siguientes parámetros:
 - Hora y tiempo de ensayo
 - Diluciones de las muestras para análisis
 - pH
 - Temperatura

- Corriente (Intensidad, A)
- Tensión (Voltaje, V)
- Conductividad
- Comentarios u observaciones

Protocolo de trabajo:

- Definir las condiciones según la tabla siguiente
- Pesar el material a disolver
- Medición de los electrodos para calcular la densidad de corriente
- Anotar volumen inicial
- Anotar tasa de agitación o recirculación
- Preparar ácido para el ajuste de pH si procede
- Preparar electrolitos
- Calibrar sonda pH y conductividad
- Comprobar el estado de las membranas si procede
- Preparar botes de muestras
- Preparar toma de muestras: pipeta, punta, matraz, rotulador, agua, ácido.
- Anotar los valores durante el ensayo, identificación de muestra, dilución y comentarios/observaciones durante el mismo

Entre las configuraciones estudiadas, se encuentran las siguientes:

- Línea Base empleando ácidos inorgánicos
- Electrolisis polvo con ácido concentración media y efecto filtración
- Electrolisis pieza 1 compartimento y ácido de concentración baja
- Electrolisis pieza 2 compartimentos y ácido de concentración baja
- Electrolisis polvo 2 compartimentos separado y ácido de concentración baja
- Electrolisis polvo 3 compartimentos separado y ácido de concentración y conductividad baja
- Electrolisis polvo 3 compartimentos con pre-lixiviado químico en medio cloruro
- Electrolisis polvo 3 compartimentos prelixiviado químico en medio sulfato
- Electrolisis 3 compartimentos celda nueva contacto directo en medio cloruro y sulfato

Se realizó un diseño de reactor electroquímico específico para el tratamiento de imanes permanentes

2.1.3. Tarea 4.3. Validación y optimización del proceso de electro-lixiviación

En el marco de la Tarea 4.3, se llevaron a cabo una serie de actividades experimentales y de análisis orientadas a validar y optimizar el proceso de electro-lixiviación previamente desarrollado. El objetivo principal de esta etapa fue confirmar la viabilidad técnica del proceso, así como afinar sus condiciones operativas para maximizar el rendimiento en la extracción de metales tanto con los electrolitos sintéticos como con las salmueras residuales reales.

Las actividades se iniciaron con una revisión y análisis detallado de los resultados obtenidos en la subtarea anterior, enfocándose en las variables clave del proceso, tales como el tipo de electrolito utilizado, el pH y conductividad de la solución, el potencial, el tipo de residuo tratado, la potencial valorización de las salmueras y el modo de operación.

A partir de estos datos, se identificaron tendencias y relaciones entre las condiciones de operación y los rendimientos alcanzados en cada ensayo. De forma adicional, se evaluó el comportamiento del sistema empleando las salmueras proporcionadas por las empresas. Esta fase implicó la preparación de nuevos lotes de muestras y control detallado de las variables del proceso.

Finalmente, se registraron las distintas condiciones con el fin de evaluar la idoneidad del proceso para ser escalado así como para recuperar los metales a partir de las disoluciones obtenidas.

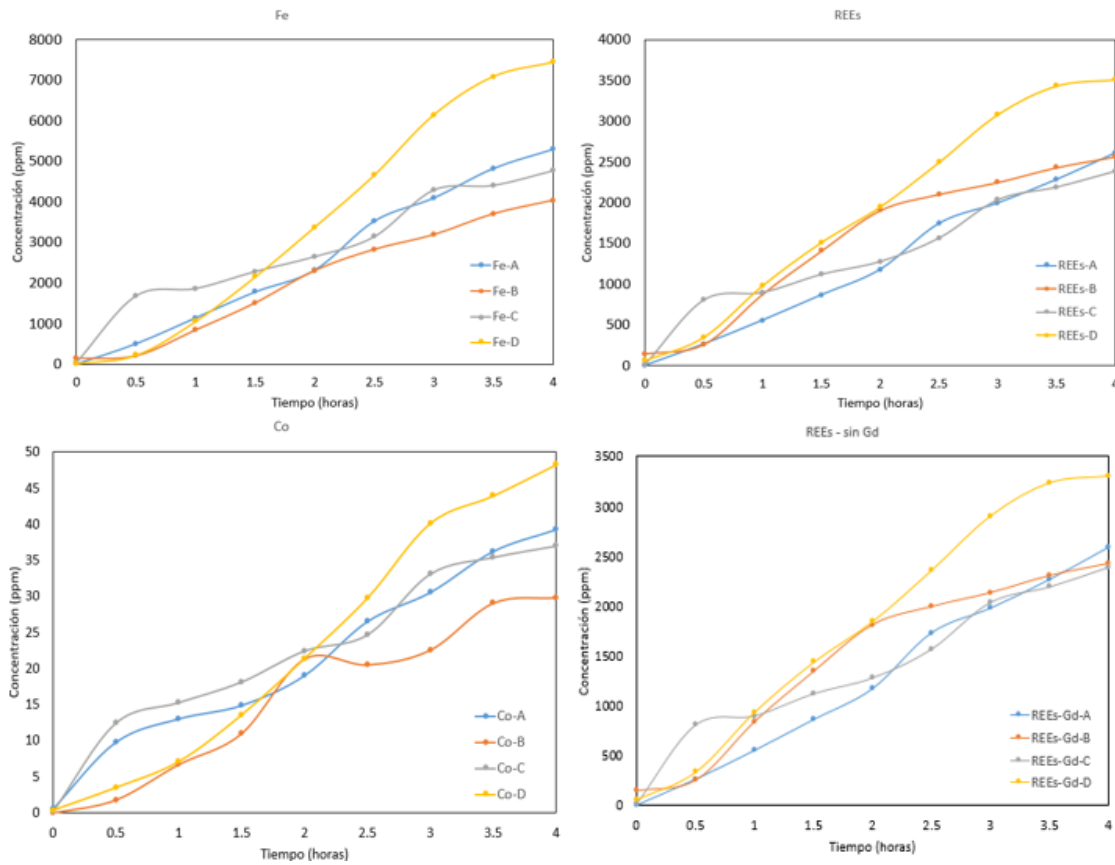


Ilustración 3. Seguimiento de la concentración para los distintos elementos en uno de los ensayos realizados

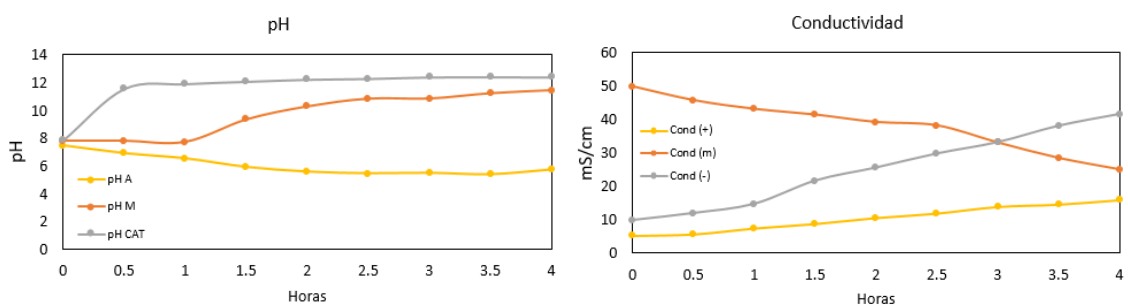


Ilustración 4. Ejemplo del seguimiento de los parámetros, pH y conductividad, respectivamente, para una celda electrolítica con 3 compartimentos.

Conclusiones PT4

Los resultados experimentales indican que los procesos electroquímicos son técnicamente viables, proporcionando buenos rendimientos tanto para la base formulada con cloruros como aquellas formuladas con sulfatos. Los resultados obtenidos con salmueras industriales y salmueras de osmosis inversa proporcionan una disolución más controlada de los imanes de NdFeB, con la necesidad de ajuste de pH para su disolución completa.

El contacto directo permite la oxidación del imán minimizando reacciones secundarias y favoreciendo una disolución más homogénea del imán. El contacto indirecto, lo cual resultaría más fácilmente escalable, es especialmente aplicable a los imanes procedentes de aerogenerador. El contacto indirecto también proporcionó buenos resultados de rendimiento de extracción, siendo necesario en todos los casos un ajuste del pH para mantener el mismo constante.

El empleo de salmueras residuales como electrolito, es decir, como medio para disolver dichos elementos, proporcionó resultados comparables a los ensayos realizados con electrolitos sintéticos. Por lo tanto, se confirma la efectividad en la recuperación de salmueras para la obtención de Fe y tierras raras, pudiendo valorizar dos residuos de forma simultánea.

Esquema general

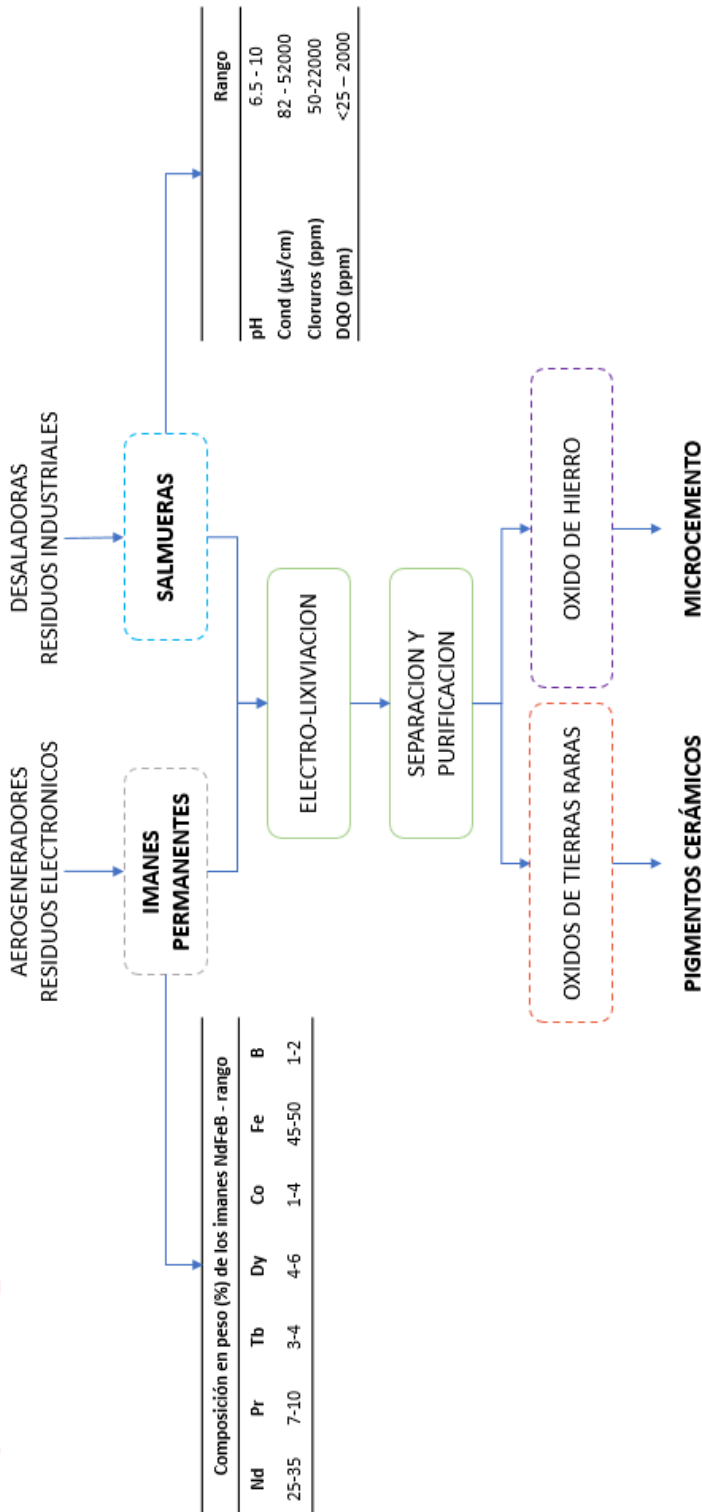


Ilustración 5. Esquema general del proyecto con rango de valores obtenido en las caracterizaciones

2.2. Purificación y recuperación de los recursos presentes en las corrientes procedentes de la electro-lixiviación (PAQUETE DE TRABAJO 5).

El objetivo de la presente tarea reside en la valorización de las disoluciones obtenidas tras el proceso de electro-lixiviación desarrollado en el PT4, en particular el hierro y las tierras raras (REEs) así como otros potenciales metales de interés, como el cobalto.

- **Separación y valorización del hierro** presente en el lixiviado para la introducción en el sector del fibrocemento
- **Purificación de REEs** y cobalto como óxidos y metal a partir del electrolito obtenido en el proceso empleando técnicas como la precipitación y tratamientos térmicos de baja temperatura. Análisis de la viabilidad para la incorporación de estos metales en el sector cerámico

En el paquete de trabajo PT5 se han realizado actividades de investigación, desarrollo y aplicación de protocolos de separación y purificación de los electrolitos obtenidos a partir de la electrolixiviación de los imanes permanentes procedentes de residuos electrónicos. Para esta fase, se ha desarrollado tratamiento sobre los residuos que contienen Fe y REES y se ha mantenido relación con empresas colaboradoras en el proyecto. Por lo tanto, las tareas realizadas mantienen consonancia con las actividades inicialmente planteadas en el mismo.

Se han estudiado las alternativas existentes en función del estado de las especies en los electrolitos y se han evaluado aquellas opciones que resulten más viables para su recuperación. Tras el proceso de obtención, se ha estudiado la viabilidad de incorporar elementos recuperados en formulaciones de los productos de algunas de las empresas colaboradoras.

Como acción común a las dos subtareas siguientes, se ha procedido a la búsqueda bibliográfica para la identificación y evaluación de las distintas alternativas actualmente llevadas a cabo. Por lo tanto, el esquema de trabajo realizado sería el siguiente:

- Estudio bibliográfico sobre las alternativas de tratamiento
- Evaluación de las alternativas potencialmente viables
- Realización de ensayos y evaluación del rendimiento para el hierro
- Realización de ensayos y evaluación del rendimiento para las REEs
- Estudio de recuperación para el Co
- Desarrollo de un proceso de valorización del Fe
- Caracterización y valorización del Fe como microcemento
- Desarrollo de un proceso de obtención de las REEs como óxidos
- Caracterización y valorización de las REEs como pigmentos

Gracias a la caracterización de la disolución resultante; Fe^{2+} o Fe^{3+} , se determinó que la mayoría del hierro disuelto en los imanes se encuentra como Fe^{2+} . Inicialmente, se

planteó la cristalización del hierro como sulfato ferroso para ser utilizado como fertilizante (FeSO_4), no obstante, la adición de sulfatos también conlleva la precipitación de las REEs, descartando esta posibilidad.

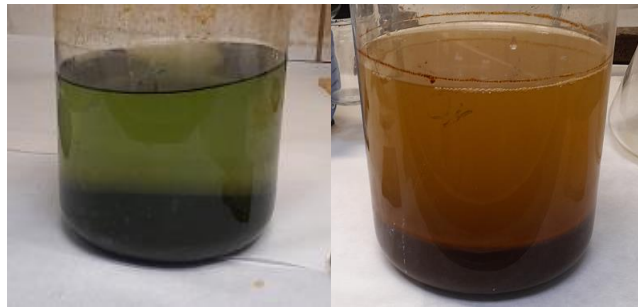


Ilustración 6. Electrolito con el Fe(II) y Fe(III), respectivamente

2.2.1. Tarea 5.1 Corrientes ricas en hierro, procedentes de la electro-lixiviación

Se han estudiado las distintas alternativas para la valorización del hierro procedente de la electro-lixiviación. Gracias a la caracterización de la disolución resultante; Fe^{2+} o Fe^{3+} , se determinó que la mayoría del hierro disuelto en los imanes se encuentra como Fe^{2+} . Inicialmente, se planteó la cristalización del hierro como sulfato ferroso para ser utilizado como fertilizante (FeSO_4), no obstante, la adición de sulfatos también conlleva la precipitación de las REEs, descartando esta posibilidad.

Alternativas y mecanismos de recuperación

En todos los casos, el proceso comienza con la lixiviación completa del residuo de imán NdFeB, dejando el hierro principalmente en su estado ferroso, Fe(II).

La precipitación directa de REE es problemática con Fe(II), ya que el oxalato ferroso ($K_{sp}=3.2 \cdot 10^7$) es altamente insoluble, interfiriendo con la precipitación selectiva de REE. En contraste, los oxalatos férricos son altamente solubles. Por lo tanto, el primer paso, tras la lixiviación, debe ser la oxidación del Fe(II) al Fe(III).

Los siguientes pasos se centran en:

- Mecanismo de oxidación del Fe(II) a Fe(III)
- Procedimiento para la precipitación del Fe(III) y obtención del pigmento
- Protocolo para la precipitación de REEs y obtención del pigmento
- Estudio para la obtención del Co (s)

Tipos de pigmentos de Fe:

En la bibliografía se encuentran diferentes compuestos de hierro con valor como pigmentos o precursores de pigmento, tales como:

- 1) Akaganeita ($\beta\text{-FeOOHCl}$) o Goetita ($\alpha\text{-FeOOH}$):

Estos compuestos se identifican como la fase obtenida tras la neutralización del lixiviado electro-oxidado en alto medio cloruro. Las fuentes indican que el Akaganeita en sí mismo puede ser utilizado potencialmente en las industrias de pigmentos.

2) Hematita (Fe_2O_3):

La hematita, u óxido de hierro, es un pigmento rojo común que se genera mediante la transformación térmica de la Akaganeita, a 250-300 °C.

3) Ferrita o magnetita (Fe_3O_4)

Pigmento negro, también conocido como magnetita, cuya calcinación genera Maghemita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), un pigmento marrón.

4) Hidróxido de hierro (III) ($\text{Fe}(\text{OH})_3$):

Pigmento amarillo o marrón dependiendo de la hidratación y de las condiciones de secado. En medio cloruros, se puede formar este hidróxido que tras su precipitado y secado se puede transformar en pigmento amarillo.

En el presente estudio, se centrará la extracción en el 2 y 4. Para la formación de los distintos pigmentos se debe tener en cuenta: los precursores de Fe (medio sulfato, cloruro, amonio etc.), temperatura y presencia de aire en el tratamiento térmico, presencia de reductores, pH, hidratación, impurezas, lavados... El resultado ideal es un tamaño de partícula fino, homogéneo y estable a la luz.

En todos los ensayos, para comprobar la eficacia del proceso, se toman muestras de las disoluciones para analizar, mediante ICP-MS los siguientes elementos, aquellos que no aparecen en resultados es debido a una baja concentración de los mismos.

Fe Nd Pr Gd Dy B Co Nb Tb Na

En el caso de los balances donde se presenten los REEs de forma genérica, se hace referencia a los siguientes:

REEs: Nd Pr Gd Dy

Los valores de las muestras líquidas se presentan en ppm, para aquellos en los que se muestran resultados de sólidos, la cuantificación de los elementos se presenta en %.

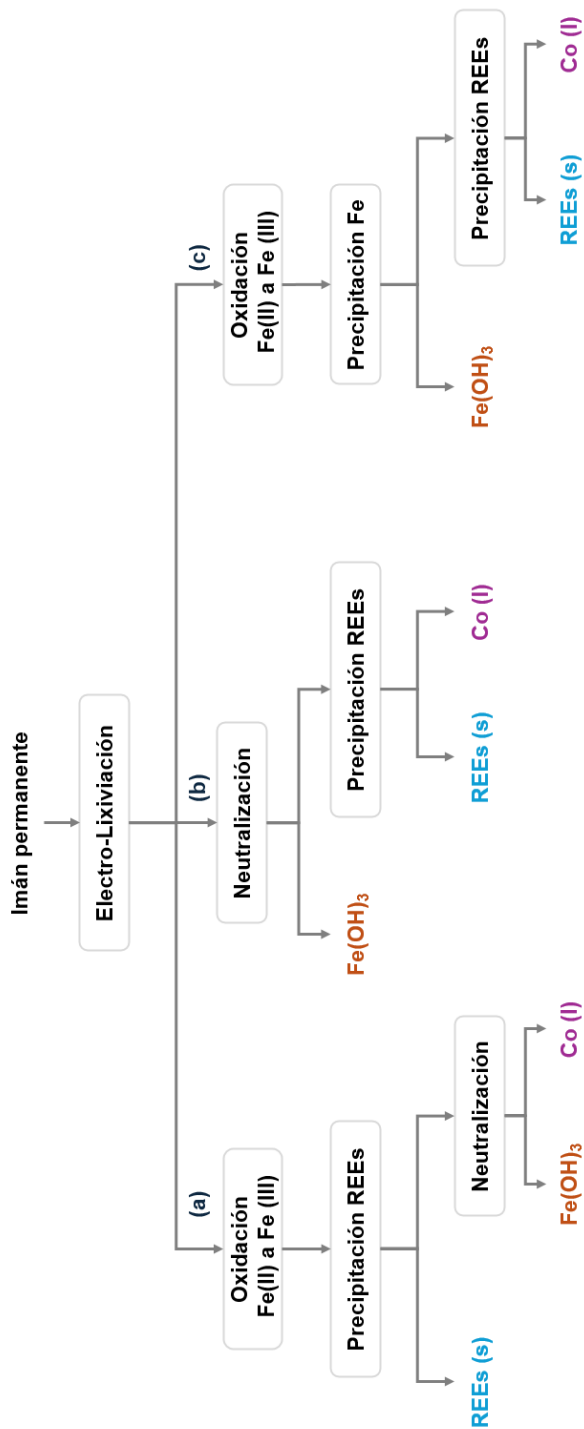


Ilustración 7. Esquema general de las alternativas de recuperación

2.2.2. Tarea 5.2 Corrientes ricas en REEs y otros metales, procedentes de la electro-lixiviación

La complejidad en la valorización de las REEs en este caso reside principalmente en el medio donde se obtienen estos elementos. El pH de la disolución, la cantidad y naturaleza del hierro y cloruros presente, afecta a la solubilidad de estas. Dichas tierras raras se obtendrían de forma conjunta ya que, debido a sus propiedades químicas similares (debido a su estructura electrónica) y solubilidades similares genera precipitados mixtos difíciles de separar.

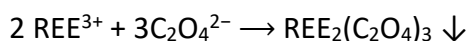
Los estudios encontrados revelan que se podría llevar a cabo una precipitación de estas especies empleando ácido oxálico, sulfato sódico o citratos entre otras especies. Tras obtener el precipitado de las REEs, se procede a su calcinación para la obtención de óxidos de REEs para su aplicación en el sector cerámico, los cuales también son caracterizados para evaluar el rendimiento y potencial valorización de los mismos.

En el lixiviado se encuentra Co, si bien éste no se encuentra en una proporción relevante en la disolución, se evalúa también la recuperación del mismo. Esto se realiza puesto que si las disoluciones se reutilizaran (i.e. se hiciera un proceso de concentración), la presencia de dicho elemento sería relevante y por lo tanto podría interesar su recuperación en términos económicos.

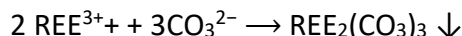
Alternativas y mecanismos de recuperación de REEs

Las tierras raras pueden obtenerse de distintas disoluciones mediante la precipitación selectiva empleando precipitantes de forma que precipiten como las siguientes especies:

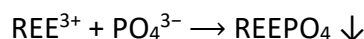
- Oxalatos de tierras raras mediante la adición de ácido oxálico (H₂C₂O₄), son muy insolubles en agua y precipitan incluso a pH bajo (pH 1-2)



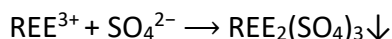
- Carbonatos de tierras raras, añadiendo por ejemplo carbonato o bicarbonato de sodio (Na₂CO₃, NaHCO₃)



- Fosfatos empleando Na₂HPO₄, para obtener fosfatos los cuales precipitarían a un pH en torno a 5 y 7

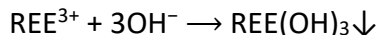


- Sulfatos de tierras raras empleando Na₂SO₄, los cuales tienen una baja solubilidad pero no son tan insolubles como los oxalatos o fosfatos



- Hidróxidos de REEs, empleando por ejemplo NH₄OH, KOH o NaOH, los cuales

precipitarían a partir de pH 8-9.



Entre los agentes precipitantes mencionados, se evalúan los complejos de mayor selectividad y que menor solubilidad presentan con las tierras raras, especialmente a pH ácido, cuya degradación tenga lugar durante la calcinación para formación de los óxidos permitiendo la obtención de óxidos de tierras raras de alta pureza.

Alternativas de recuperación cobalto

1. Electrodeposición.

En este proceso, el cobalto en su forma iónica (Co^{2+}) se reduce a metal en el cátodo de un electrodo, utilizando una corriente eléctrica. Generalmente se usa en soluciones que contienen cobalto como parte de una mezcla de metales, estudiando el potencial óptimo de trabajo para realizar la electrodeposición selectiva. La concentración mínima de cobalto necesaria para la electrodeposición depende de la densidad de corriente y la composición de la solución, pero generalmente se requieren concentraciones de al menos 1-2 g/L de Co^{2+} para obtener un rendimiento económico y eficiente. En algunos casos, puede funcionar con concentraciones más bajas, pero las tasas de deposición serán más lentas.

2. Precipitación

En este método, se añaden reactivos para formar un precipitado insoluble del cobalto, generalmente en forma de hidróxido de cobalto ($\text{Co}(\text{OH})_2$) o carbonato de cobalto (CoCO_3), dependiendo del pH y los reactivos utilizados. La precipitación por pH se da cuando el pH de la solución se ajusta para hacer que el cobalto forme un precipitado. Para obtener un precipitado cuantitativo, las concentraciones generalmente deben ser más altas (al menos 1 g/L de Co^{2+}). Puede ser menos selectivo, lo que implica que otros metales presentes en la solución también se precipiten, lo que puede requerir pasos adicionales para purificar el cobalto.

3. Disolventes

Se utiliza un disolvente orgánico como keroseno o alquilosulfóxido, donde el cobalto se extrae a la fase orgánica y se puede posteriormente recuperar por stripping (desplazamiento del metal desde la fase orgánica). Como desventajas, el empleo de disolventes no se considera sostenible y seguro, además de necesitar etapas posteriores para separar y purificar el cobalto, especialmente a bajas concentraciones.

4. Intercambio iónico

El intercambio iónico puede ser efectivo a concentraciones tan bajas como 0.01-0.1 g/L de Co^{2+} . Es un método muy eficiente para separar cobalto a concentraciones bajas en mezclas complejas de metales, no obstante, al haber altas concentraciones de otros

elementos esta tecnología ve disminuida su rendimiento. Además, se generan corrientes residuales debido a la necesidad de regeneración de las resinas.

Finalmente, el estudio de recuperación del Co se realizó mediante el empleo de técnicas electroquímicas, con el fin de electrodepositar (EW) selectivamente el Co con respecto al resto de metales presentes en la disolución. El procedimiento realizado para este estudio ha sido el siguiente:

1. Voltametrías cíclicas (CVs) de las disoluciones obtenidas previa a la EW
2. CVs a diferentes potenciales: determinación del potencial de trabajo para las EW
3. Análisis de los depósitos obtenidos en las CVs mediante FRX
4. Análisis de los metales mediante digestión e ICP
5. Cuantificación de los metales de los electrolitos al inicio y al final del ensayo por ICP

Cada uno de los electrolitos (al pH de la disolución sin modificar, 2) se introdujo en una celda sin compartimentar, empleando dos electrodos de Ti de 1 cm² y un electrodo de referencia de Ag/AgCl.

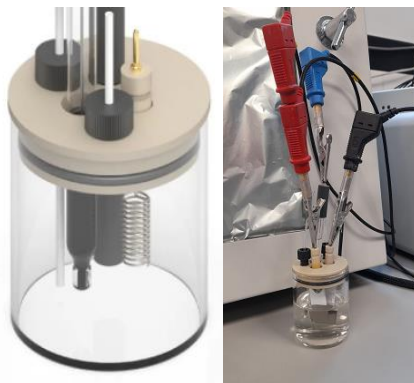
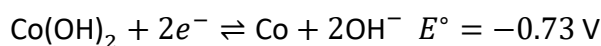
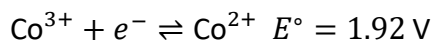
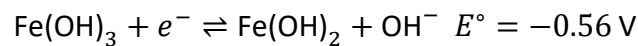
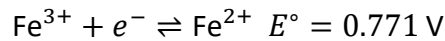
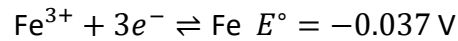
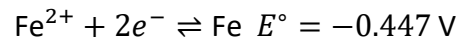
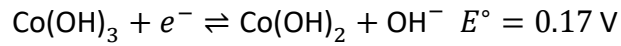


Ilustración 8. Montaje en celda sin compartimentar de Redox.me

La voltametría inicial presenta un pico de reducción en torno a -1 V y -1.3 V y un contrapico de oxidación a -0.5 V aproximadamente. Por los potenciales de reducción estándar presentados a continuación, se descarta la presencia de Co³⁺ en la disolución, pudiendo deberse este incremento en la corriente a la reducción del Co²⁺ o del Co(OH)₂; no obstante, si observamos los potenciales de reducción correspondientes al hierro, la reducción del mismo se presenta a potenciales similares. En particular, la presencia de Fe³⁺ en la disolución podría hacer que este se depositara antes que el Co.





Los estudios de EW para el Co se llevaron a cabo a tres potenciales diferentes, en base a las CVs obtenidas. Estos potenciales fueron: -1 V, -1.1 V y -1.2 V.

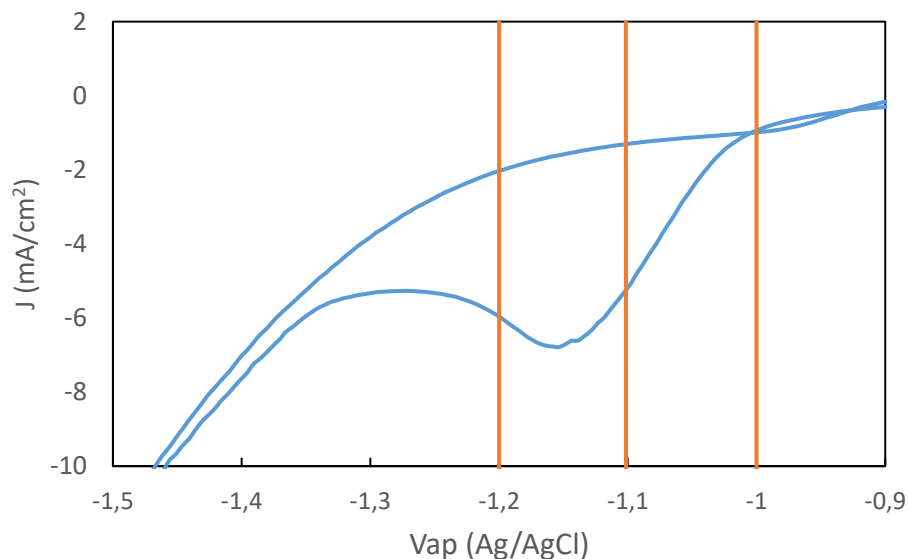
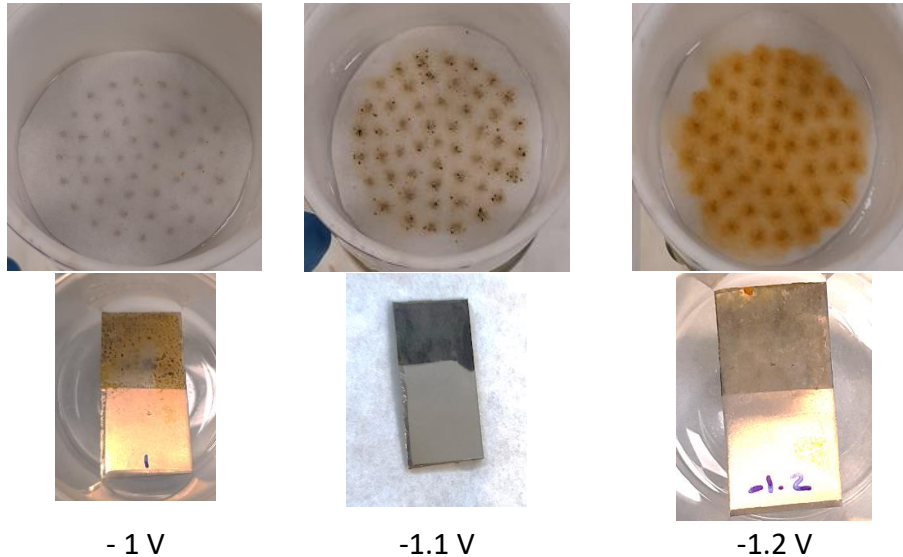


Ilustración 9. Estudios de EW a potencial constante. En naranja, los tres potenciales estudiados. En primer lugar, se realizó el medio, después el menos catódico y, finalmente el -1.2 V.

Se tomaron muestras del líquido tanto al inicio como al final de las EW, no obstante, el cambio en la concentración de las muestras al inicio y al final no proporciona información suficiente por ser poca la diferencia y haber error por la dilución en el muestreo.

El electrolito, por lo tanto, se filtró para cada uno de los potenciales con el fin de determinar y cuantificar los elementos presentes en el precipitado.



Teniendo en cuenta los resultados anteriores, ya que se prioriza la electrodeposición como método de refinado para el Co, se considera la mejor alternativa el trabajo al potencial que presenta un mayor incremento de la proporción Co/Fe y el valor en masa del precipitado es inferior.

2.2.3. Resultados de recuperación

Se procesaron diversos lotes de imanes para obtener y valorizar los productos (pigmentos de REEs y Fe) bajo los requerimientos definidos por las empresas.

Para obtener dichos productos, se realizó el proceso de extracción optimizado basado en los resultados del PT4 (electrolixiviación) y del PT5 (recuperación).

Además, se caracterizó cada uno de los productos obtenidos para confirmar la idoneidad de los materiales.

En la caracterización de los pigmentos de hierro se puede observar las buenas características en términos de pureza, obteniendo en cada caso, los pigmentos deseados.

En las imágenes y análisis del SEM se puede observar el tamaño de los óxidos obtenidos así como la elevada pureza de los mismos. En línea con lo esperado, la composición global de las REEs comprende $Nd > Pr > Gd > Dy$.

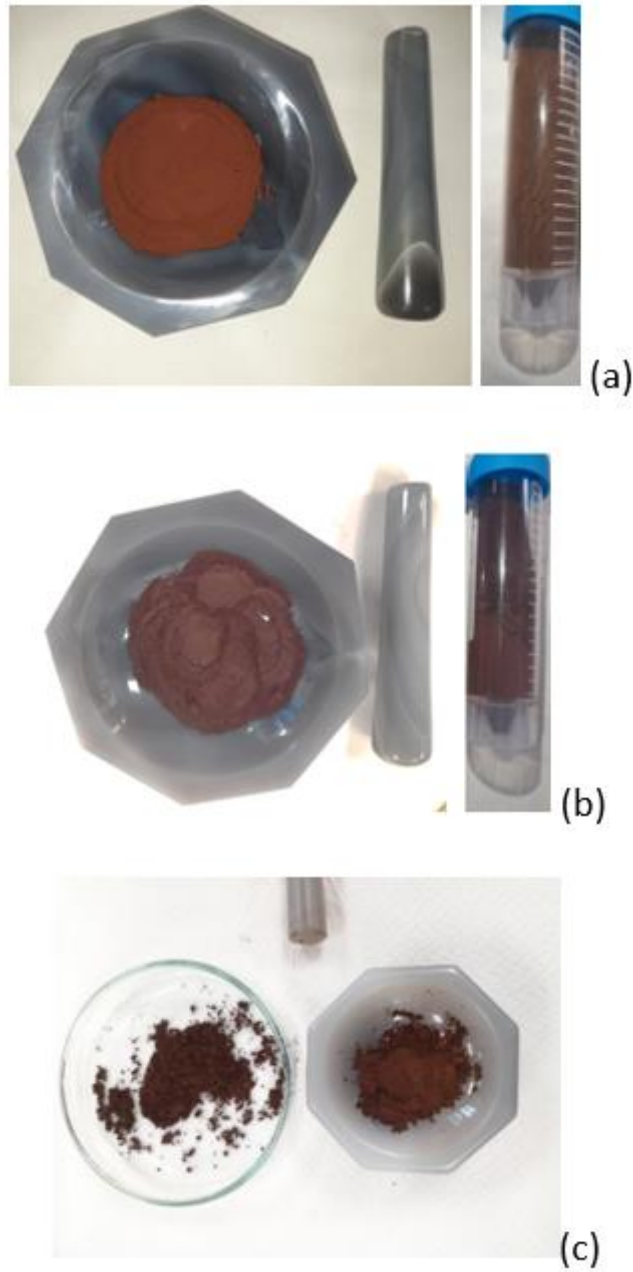


Ilustración 10. Productos obtenidos a partir de los imanes permanentes mediante el proceso desarrollado; (a) $\text{Fe}(\text{OH})_3$, (b) Fe_2O_3 (c) óxidos de REEs

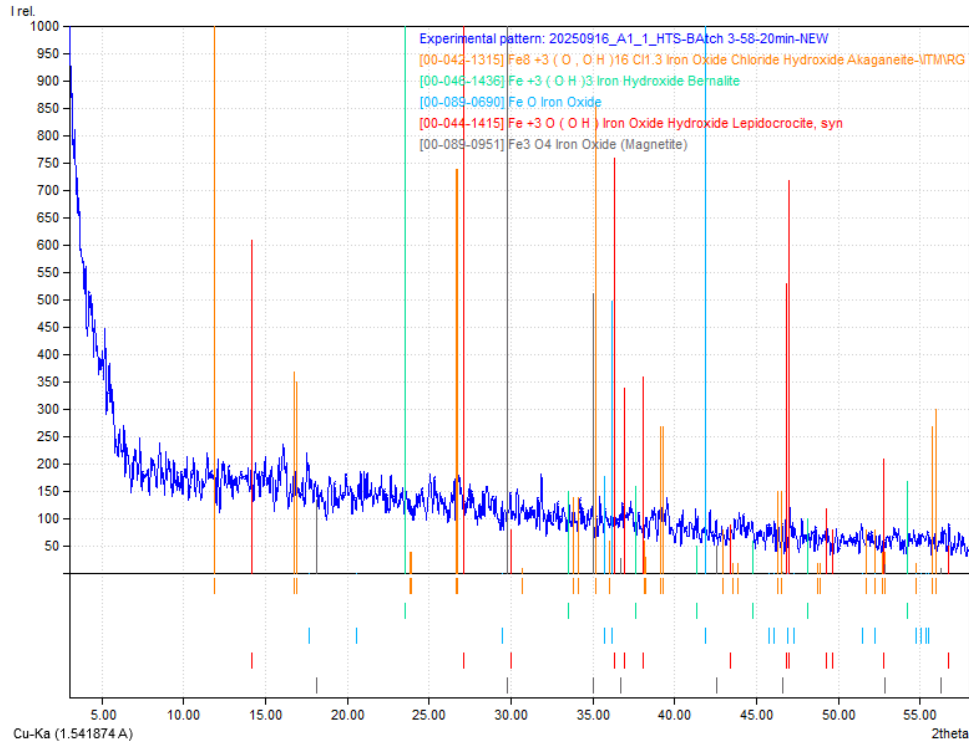


Ilustración 11. Difracción de Rayos X de la muestra $Fe(OH)_3$

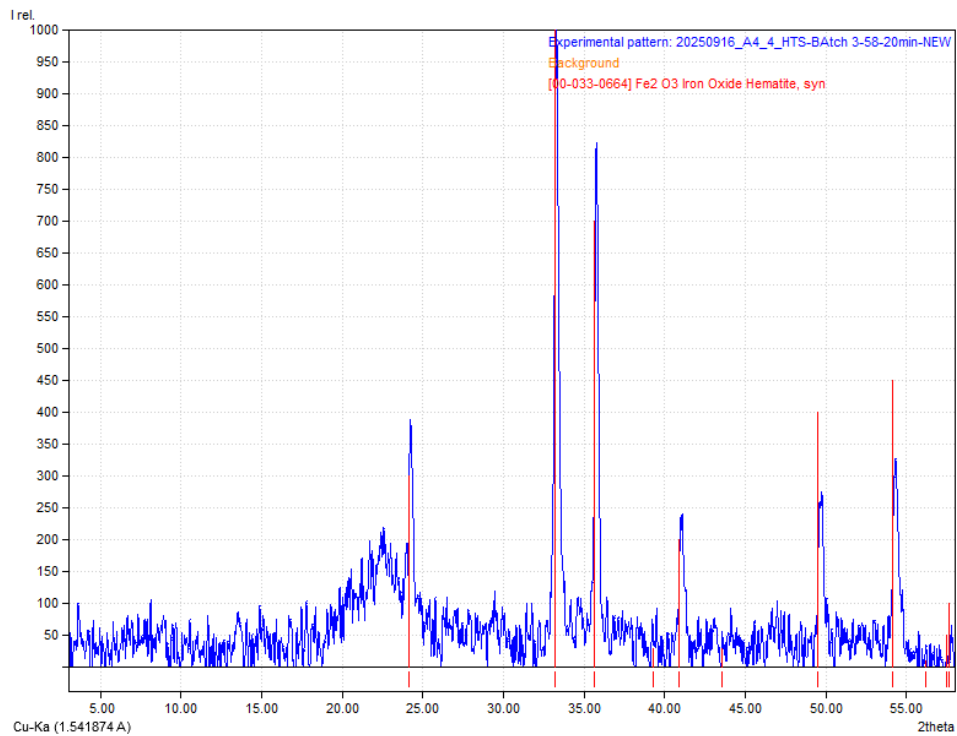
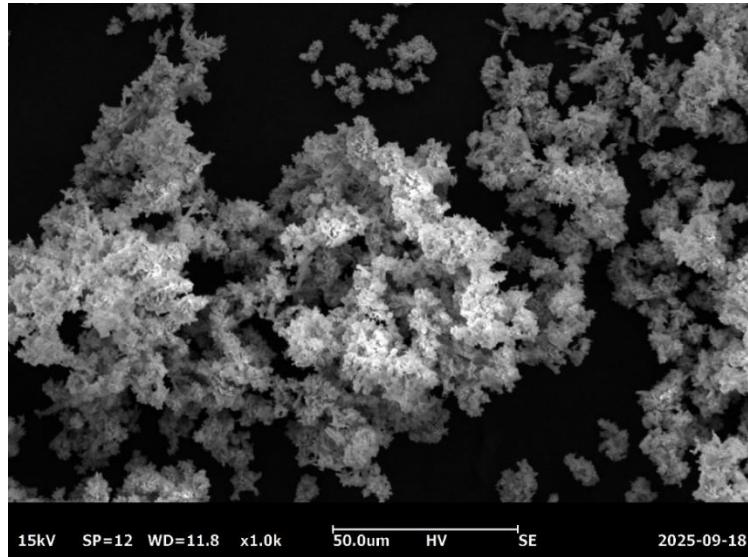


Ilustración 12. Difracción de Rayos X de la muestra Fe_2O_3



Electron Image 1

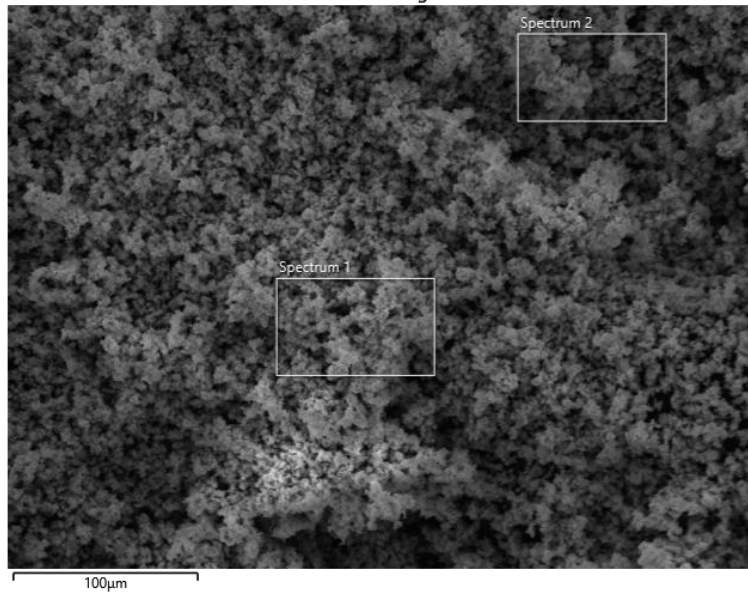
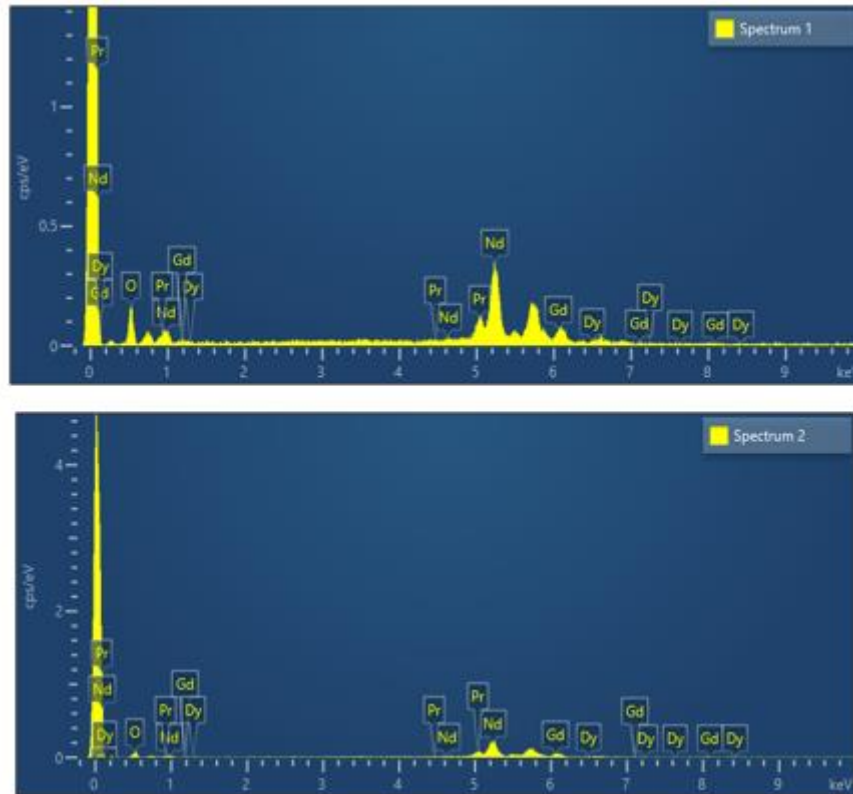


Ilustración 13. Imágenes SEM de los óxidos de REEs



	Spectrum 2	Spectrum 1
Element	Atomic %	Atomic %
O	62.56	71.55
Pr	7.53	5.67
Nd	27.86	22.08
Gd	1.47	0.37
Dy	0.59	0.33
Total	100	100

Ilustración 14. Caracterización de la muestra de óxidos de REEs en distintos puntos

2.3. Proceso para la valorización de los PMs y estudio técnico-económico de la tecnología (PAQUETE DE TRABAJO 6)

El objetivo de esta tarea es el desarrollo de un proceso completo de recuperación de las REEs contenidas en los imanes, mediante la electrolixiviación como tecnología sostenible de extracción. En el estudio se han tenido en cuenta los datos obtenidos en el estado del arte, así como en los resultados empíricos obtenidos en los PT4 y PT5.

Se ha realizado un estudio exhaustivo del estado del arte, incluyendo rutas pirometalúrgicas, hidrometalúrgicas y electroquímicas, así como proyectos europeos relevantes. Esta revisión confirma que los métodos electroquímicos se posicionan como la alternativa más prometedora para maximizar la selectividad hacia REEs frente al hierro y minimizar el impacto ambiental del proceso.

Asimismo, se ha elaborado un diagrama de flujo preliminar del proceso y un análisis técnico-económico que abarca el CAPEX, OPEX, potenciales ingresos y dinámica del mercado internacional de REEs. Los resultados indican que, pese a requerir una inversión inicial significativa, la tecnología presenta ventajas competitivas derivadas de su bajo consumo de reactivos, su eficiencia metalúrgica y la creciente demanda de REEs en sectores estratégicos como la movilidad eléctrica o la energía eólica.

Finalmente, se ha estudiado la viabilidad de comercializar los REEs recuperados en forma de disolución concentrada, identificando potenciales compradores y formatos de venta compatibles con las tecnologías industriales actuales.

2.3.1. Tarea 6.1. Propuesta de proceso y estudio técnico económico

Tecnologías para la recuperación efectiva de los metales críticos

Aunque el reciclaje de imanes NdFeB es posible, la tecnología actual para recuperar metales críticos como el neodimio, disprosio y boro no es lo suficientemente eficiente ni económica. Los métodos tradicionales, como la lixiviación ácida o la separación mecánica, pueden ser costosos, lentos y no siempre logran una recuperación completa de los materiales. Además, estos procesos a menudo producen residuos secundarios que pueden generar más problemas ambientales. La recuperación de materiales contenidos en PMs, especialmente los de NdFeB, es crucial debido a que contienen REEs considerados materiales críticos.

Las tecnologías de reciclaje de PMs se clasifican generalmente en tres grandes rutas, además de métodos emergentes y combinados:

- Métodos de reutilización directa
- Procesamiento pirometalúrgico

- Procesamiento hidrometalúrgico
- Procesos electroquímicos y electrometalúrgicos
- Otros métodos

Comparación de los métodos electroquímicos con métodos convencionales

La lixiviación electroquímica aplicada a PMs agotados (principalmente Nd-Fe-B y Sm-Co) representa un cambio paradigmático respecto a las rutas extractivas tradicionales basadas en la minería y concentración de minerales portadores de REEs. Las mejoras pueden agruparse en cuatro dimensiones principales:

- o Mejora en eficiencia metalúrgica y selectividad
- o Menor consumo de reactivos y reducción de residuos
- o Mejora en sostenibilidad y huella ambiental
- o Integración directa con procesos de fabricación de imanes

Los métodos convencionales a menudo no cumplen con los requisitos de sostenibilidad y eficiencia de las tecnologías más recientes, a pesar de lograr altos rendimientos en pocos pasos.

<i>Tecnología</i>	Rendimiento de REEs (Lixiviación/Recuperación)	Requisitos clave no satisfechos
<i>Hidrometalurgia convencional (p. ej., con HCl o H₂SO₄)</i>	La lixiviación puede ser completa (hasta 100% de lixiviado). La recuperación posterior puede alcanzar hasta 97.1%.	Selectividad baja: El hierro (el componente principal) se co-extrae, lo que requiere múltiples pasos, gran cantidad de reactivos químicos y genera grandes cantidades de residuos líquidos.
<i>Pirometalurgia o tostado</i>	La lixiviación de la muestra tostada con HCl puede recuperar REEs de forma casi cuantitativa, dejando óxido de hierro en el residuo. La pureza puede ser alta (98% o 99.4% para rutas específicas).	Alto consumo de energía: Requiere altas temperaturas (por ejemplo, tostado a 800°C-900°C, lo que resulta en un alto consumo de energía. El proceso puede ser lento, requiriendo 5 días para la extracción completa de REEs después del tostado oxidativo.
<i>Tratamiento mecano-químico húmedo</i>	Alta recuperación (97%) y alta pureza (> 99.9%).	Si bien es un método ecológico (bajo consumo de energía, sin calentamiento externo), la aplicabilidad de esta técnica a la separación de elementos con características de disolución y precipitación similares es limitada.

Conclusiones sobre el reciclaje de PMs

La transición hacia una energía verde está impulsando la demanda de imanes NdFeB, lo que a su vez está contribuyendo al incremento de los RAEEs. Este aumento de RAEEs pone en evidencia la necesidad urgente de una gestión adecuada de residuos y de tecnologías eficientes para recuperar los metales críticos contenidos en PMs. Sin embargo, el reciclaje no solo enfrenta obstáculos técnicos, como la falta de tecnologías adecuadas, sino también un contexto geopolítico complicado, donde la dependencia de China para el suministro de REEs pone en riesgo la estabilidad del mercado. Además, el impacto en la salud relacionado con la exposición a materiales tóxicos subraya la importancia de implementar sistemas de reciclaje seguros y efectivos para proteger tanto al medio ambiente como a las personas.

Las tecnologías basadas en la electro-disolución (o combinadas con hidrometalurgia) están demostrando ser las que mejor responden a la necesidad de lograr altos rendimientos de recuperación y pureza (> 97% y > 99%, respectivamente), al tiempo que abordan los desafíos cruciales de la sostenibilidad: reducción de residuos y disminución del consumo de químicos/energía asociados con los procesos convencionales. Estos métodos representan un avance significativo hacia una solución viable y ecológica para el reciclaje de PMs.

Sin embargo, a pesar de estos resultados prometedores a escala de laboratorio o piloto, la tecnología de reciclaje de REEs en la industria sigue siendo inmadura y la implementación a gran escala aún enfrenta barreras logísticas y económicas. Los diferentes proyectos que se están llevando a cabo en la UE han elevado estas tecnologías a un nivel de madurez tecnológica de TRL 6-7, indicando una disponibilidad creciente.

Conclusiones del estudio técnico económico, de mercado y legislativo

El análisis técnico-económico se centra en la innovación, los costes de producción, las tecnologías de generación y reciclaje, y el impacto económico del sector eólico en España.

La complementariedad entre energía eólica y movilidad eléctrica es clave para la neutralidad climática europea. El periodo 2025–2035 será decisivo para asegurar redes, almacenamiento, inversión industrial y estabilidad normativa.

La implementación de la tecnología de disolución electroquímica para la recuperación de REEs es como invertir en un costoso y avanzado laboratorio. El CAPEX inicial es alto (el coste de construir el laboratorio y los equipos sofisticados de reciclaje), pero el OPEX es potencialmente bajo (el proceso consume menos electricidad y químicos que los métodos antiguos, como la quema o la disolución masiva). El éxito económico dependerá de que los productos recuperados (los REEs de alta pureza) puedan competir

con los precios volátiles del mercado primario, dominado por un solo actor, y, crucialmente, de asegurar un flujo constante y predecible de desperdicio valioso de fábricas y vehículos eléctricos para mantener el laboratorio funcionando de manera rentable.

Las regulaciones en Europa y España entre 2020 y 2025 han creado un marco robusto para el impulso de la energía eólica y la electrificación del transporte. A nivel europeo, las políticas de descarbonización y la legislación ambiental han sido clave para fomentar estos sectores, mientras que a nivel nacional, España ha avanzado en sus propios compromisos con el PNIEC y la Ley de Cambio Climático, ofreciendo incentivos y apoyos a los sectores de energía renovable y vehículos eléctricos.

Las principales áreas de éxito incluyen la expansión de infraestructuras, el fomento de la inversión pública y privada y la simplificación de permisos. Sin embargo, todavía existen retos relacionados con la agilización de los trámites administrativos, la capacidad de almacenamiento.

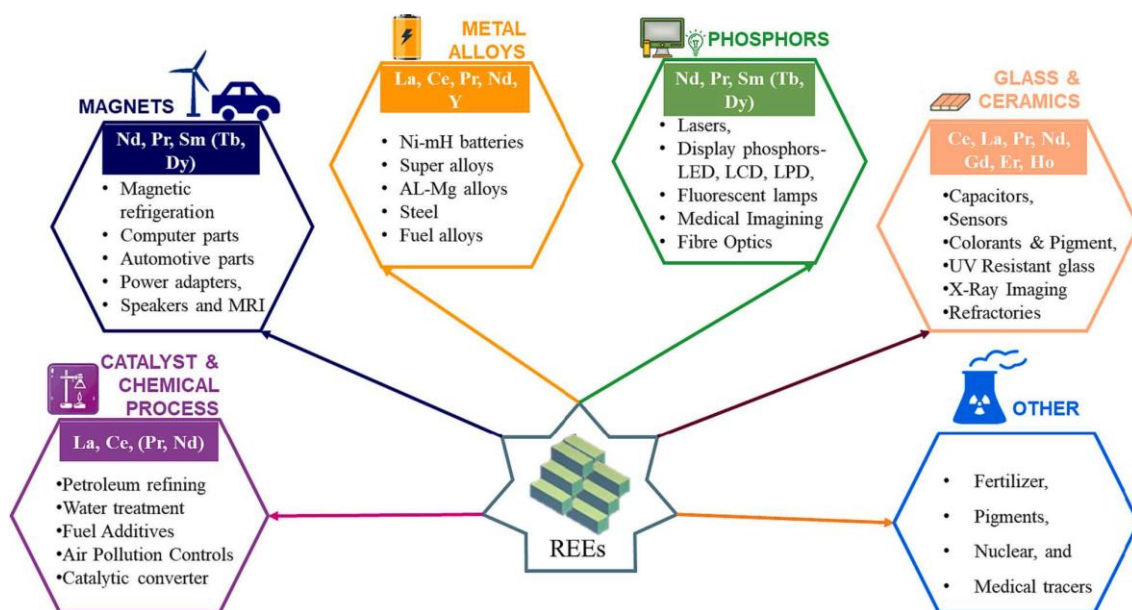


Ilustración 15. Aplicaciones industriales de los REEs.

Los coproductos recuperados presentan un amplio abanico de aplicaciones estratégicas de alto valor.

Conclusiones PT6

El análisis realizado demuestra que la electro-lixiviación constituye una de las tecnologías más sostenibles y selectivas para la recuperación de REEs contenidos en imanes permanentes al final de su vida útil. El proceso ofrece ventajas significativas respecto a las rutas hidro- y pirometalúrgicas convencionales, incluyendo una mayor eficiencia en la disolución anódica, reducción notable del uso de reactivos, menor generación de residuos y posibilidad de operar a temperatura ambiente.

Los resultados del estudio técnico-económico confirman que, aunque la inversión inicial requerida es elevada debido a la madurez tecnológica actual, los costes operativos son competitivos y compatibles con un modelo industrial basado en economía circular. La capacidad de producir concentrados de REEs con elevada pureza y coproductos férricos de interés industrial refuerza la viabilidad del proceso.

Desde el punto de vista del mercado, la demanda creciente de REEs —especialmente Nd, Pr y Dy— posiciona a esta tecnología como una solución estratégica para reducir la dependencia estructural de proveedores extracomunitarios. Del mismo modo, la aceptación industrial de concentrados líquidos de REEs facilita su integración en cadenas de separación existentes basadas en extracción por disolventes.

En conjunto, la tecnología estudiada muestra un alto potencial para ser incorporada en futuras plantas de reciclaje de imanes permanentes, contribuyendo a un suministro más estable y sostenible de REEs y reforzando la resiliencia de las cadenas de valor europeas asociadas a la transición energética. Dicho contenido puede resumirse en los siguientes puntos:

Innovación en la Recuperación de REEs

El proceso electroquímico para la lixiviación de imanes permanentes (PMs) permite una alta recuperación de REEs (99%) y reduce el impacto ambiental, comparado con métodos convencionales.

Beneficios Ambientales y Económicos

Menor consumo de reactivos y residuos, con aplicaciones de alto valor para los subproductos recuperados, como pigmentos y catalizadores.

Integración directa con la fabricación de imanes, aumentando la viabilidad económica y la sostenibilidad.

Viabilidad Comercial

El proceso es competitivo, con bajos costos operativos y potencial de mercado, especialmente en sectores como la energía eólica y vehículos eléctricos.

Desafíos para Escala Industrial

La implementación a gran escala enfrenta altos costos iniciales y barreras logísticas en la recolección y reciclaje de materiales.

Impacto de Políticas Europeas

Las políticas como el Green Deal y la Ley de Cambio Climático impulsan la demanda de REEs reciclados, favoreciendo la transición a una economía circular.

3. Conclusiones

El proyecto demuestra que la electro-lixiviación es una tecnología eficaz y sostenible para la recuperación de tierras raras y hierro a partir de imanes permanentes al final de su vida útil. Los ensayos realizados confirman la viabilidad técnica del proceso tanto utilizando electrolitos sintéticos como salmueras residuales, lo que supone una oportunidad adicional de valorización de residuos industriales. Los métodos de contacto directo e indirecto ofrecen buenos rendimientos de disolución, requiriendo únicamente ajustes de pH para garantizar una operación controlada.

La recuperación y caracterización de los productos obtenidos —pigmentos férricos y concentrados de REEs— evidencian elevados niveles de pureza y composiciones coherentes con las expectativas industriales, lo que confirma la idoneidad de los materiales para su posterior aprovechamiento.

Desde una perspectiva técnico-económica, el proceso presenta ventajas significativas frente a rutas convencionales, con menor consumo de reactivos, menor generación de residuos y capacidad para operar en condiciones suaves. Si bien la inversión inicial constituye un reto para su escalado, los costes operativos y la creciente demanda de tierras raras (especialmente Nd, Pr y Dy) refuerzan su viabilidad industrial en un contexto de economía circular.

Finalmente, la alineación del proceso con las políticas europeas de sostenibilidad, transición energética y reducción de dependencia estratégica posiciona esta tecnología como una alternativa sólida para futuras plantas de reciclaje, contribuyendo a un suministro más estable, eficiente y ambientalmente responsable de tierras raras.

4. Bibliografía

1. U. Kamachi Mudali, Manisha Patil, R. Saravanabhavan, V. K. Saraswat. Review on E-waste Recycling: Part II—Technologies for Recovery of Rare Earth Metals. Transactions of the Indian National Academy of Engineering

DOI: <https://doi.org/10.1007/s41403-021-00231-0>

2. Irina Makarova, Jacek Ryl, Zhi Sun, Irina Kurilo, Karolina Górnicka, Markku Laatikainen, Eveliina Repo. One-step recovery of REE oxalates in electro-leaching of spent NdFeB magnets. Separation and Purification Technology

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117362>

3. Ryo Sasai, Naohiro Shimamura. Technique for recovering rare-earth metals from spent sintered Nd-Fe-B magnets without external heating. Journal of Asian Ceramic Societies DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jascer.2016.01.009>

4. Prakash Venkatesan, Z.H.I. Sun, Jilt Sietsma, Yongxiang Yang. An environmentally friendly electro-oxidative approach to recover valuable elements from NdFeB magnet waste. Separation and Purification Technology

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2017.09.053>

5. Anna Klemettinen, Zbigniew Adamski, Ida Chojnacka, Anna Leśniewicz, Leszek Rycerz. Recovery of Rare Earth Elements from the Leaching Solutions of Spent NdFeB Permanent Magnets by Selective Precipitation of Rare Earth Oxalates. Minerals

DOI: <https://doi.org/10.3390/min13070846>

6. Anna Klemettinen, Andrzej Żak, Ida Chojnacka, Sabina Matuska, Anna Leśniewicz, Maja Weźna, Zbigniew Adamski, Lassi Klemettinen, Leszek Rycerz. Leaching of Rare Earth Elements from NdFeB Magnets without Mechanical Pretreatment by Sulfuric and Hydrochloric Acids. Minerals

DOI: <https://doi.org/10.3390/min11121374>

7. Irina Makarova, Ekaterina Soboleva, Maria Osipenko, Irina Kurilo, Markku Laatikainen, Eveliina Repo. Electrochemical leaching of rare-earth elements from spent NdFeB magnets. Hydrometallurgy

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105264>

8. Eimear Deady, Richard Shaw, Kathryn Goodenough. Research and development for the Rare Earth Element supply chain in Europe. Summary Brochure del proyecto EURARE

9. V. Prakash, Zhi H.I. Sun, Jilt Sietsma, Yongxiang Yang. Simultaneous electrochemical recovery of rare earth elements and iron from magnet scrap: a theoretical analysis. Capítulo 22 Rare Earths Industry

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-802328-0.00022-X>

10. Aarti Kumari, Dipali, Navneet S. Randhawa, Sushanta K. Sahu. Electrochemical treatment of spent NdFeB magnet in organic acid for recovery of rare earths and other metal values. Journal of Cleaner Production

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127393>

11. Prakash Venkatesan, Z.H.I. Sun, Jilt Sietsma, Yongxiang Yang. An environmentally friendly electro-oxidative approach to recover valuable elements from NdFeB magnet waste. Separation and Purification Technology 191 (2018) 384–391

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2017.09.053>

12. Qingsheng Liu, Tao Tu, Hao Guo, Huajin Cheng, Xuezhong Wang. High-efficiency simultaneous extraction of rare earth elements and iron from NdFeB waste by oxalic acid leaching. Journal of Rare Earths 39 (2021) 323e330

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jre.2020.04.020>

13. Wencai Zhang, Aaron Noble, Bin Ji, Qi Li. Effects of contaminant metal ions on precipitation recovery of rare earth elements using oxalic acid. Journal of Rare Earths 40 (2022) 482e490

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jre.2020.11.008>

14. J. BADENES, E. CORDONCILLO, M.A. TENA, P. ESCRIBANO, J. CARDA, G. MONROS. Análisis de las variables de síntesis del pigmento amarillo de praseodimio en circón. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, 34 147-152 (1995)

15. Soroush Rahmati, Ionela Birloaga, Pietro Romano, Francesco Vegliò. Optimization of rare earth magnet recovery processes using oxalic acid in precipitation stripping: Insights from experimental investigation and statistical analysis. Heliyon 10 (2024) e34811

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34811>

AIDIMME
Instituto Tecnológico

Domicilio fiscal —

C/ Benjamín Franklin 13. (Parque Tecnológico)

46980 Paterna. Valencia (España)

Tlf. 961 366 070 | Fax 961 366 185

Domicilio social —