

INFORME

PROYECTOS—

2023-2024

**CIRCULARIDAD DE METALES EN RESIDUOS DE ALTO IMPACTO
“CIMERAI”**

Informe: Final de Resultados

Programa: Proyectos de I+D en colaboración con empresas

Número de proyecto: 22300050

Expediente: IMDEEA/2023/25

Duración: 01/07/2023 - 30/09/2024

Coordinado en AIDIMME por: Silvia Oyonarte



AIDIMME
INSTITUTO TECNOLÓGICO

ÍNDICE

1	<i>Introducción, objetivos del proyecto</i>	1
2	<i>Actividades realizadas, desarrollo del proyecto</i>	3
	PT 1. Gestión y coordinación del proyecto.	3
	PT 2. Difusión.	4
	PT 3. Transferencia y promoción de resultados.	8
	PT 4. Definición de línea base en la extracción de metales contenidos en residuos de alto impacto a través de tecnologías de bajo impacto ambiental.	9
	PT 5. Diseño y construcción de un prototipo para la extracción de metales contenidos en residuos de alto impacto.	12
	PT 6. Definición de línea base en la extracción de metales contenidos en residuos de metales en diferentes residuos de alto impacto.	14
	PT 7. Alternativas de valorización de metales de valor añadido extraídos de residuos de alto impacto	18
3	<i>Resultados</i>	24
4	<i>Conclusiones</i>	25

1 Introducción, objetivos del proyecto

Este proyecto se enmarca en las investigaciones que AIDIMME está realizando en los últimos años, relativas al desarrollo de estrategias de extracción y recuperación de metales que se encuentran en residuos de elevado impacto, ya sea por su criticidad o por el volumen de residuos que pueden representar en la actualidad y en un futuro próximo.

El aumento en la demanda de los vehículos eléctricos, así como de los equipos eléctricos y electrónicos (AEE), implica la generación de una gran cantidad de residuos peligrosos al final de su vida útil además de suponer una importante pérdida de los recursos valiosos de los que se componen.

Este tipo de residuos se caracterizan por una composición variable, lo que hace compleja su valorización, pero también se caracterizan por tener un elevado contenido en metales de interés. Entre estos metales, se encuentran materias primas críticas (Li, Co, grafito, bauxita según listado 2020), los metales base (Cu, Al, Zn, Ni) y metales preciosos (Au, Ag, Pt...), entre estos últimos también los considerados como críticos para la UE (Metales del grupo platino).

Para reducir la dependencia de combustibles fósiles hacia una economía basada en energías renovables, hacen falta tecnologías compuestas por una cantidad mayor de minerales que las tecnologías convencionales (por ejemplo, los coches eléctricos, turbinas eólicas, paneles solares etc.). Respecto a la revisión del listado de materias primas críticas, esta se realiza no solo en función de la escasez de recursos globales, sino también considerando el precio y la dependencia externa de estos recursos (importancia socioeconómica de los mismos). Una situación global inestable impulsada por la pandemia y la situación con Rusia ha provocado un importante incremento de los precios de muchas materias, complicando el suministro de recursos a la Unión Europea. Entre los elementos cuya demanda está previsto un aumento de más de 10 veces en el mercado global, se encuentran el Litio (x42), grafito (x25), Cobalto (x21) y Níquel (x19). En Europa, está prevista la revisión de las materias primas críticas en 2023, estando ya contemplado en el listado de Estados Unidos (2022) metales como el Zinc, Níquel, Aluminio y Manganeso.

Debido a ello, este tipo de residuos se están viendo como una potencial fuente secundaria de recursos (lo que se conoce como minería urbana), para lo cual se debe profundizar no solo en la investigación sobre tecnologías de tratamiento sino también en el desarrollo de equipos capaces de tratar estos residuos de alto valor añadido. Aunque parezcan cantidades despreciables de metal por cada pieza o residuo, el aprovechamiento unitario a gran escala llevaría a números totales importantes

respecto a metal recuperado.

Actualmente, el número de plantas adecuadas para el tratamiento de este tipo de residuos es limitado en todo el mundo, y se basan en procesos altamente contaminantes y costosos energéticamente. También existen tratamientos mecánicos, térmicos e hidrometalúrgicos con disolventes para la separación de los metales, procesos que se solapan para incrementar el rendimiento de separación, pero requieren numerosas etapas conllevando finalmente a un elevado coste e impacto ambiental.

En el presente proyecto de investigación se planteó el desarrollo de una metodología y creación de un prototipo versátil capaz de tratar residuos de elevado impacto. El piloto debe incluir tecnologías sostenibles de aplicación siguiendo una secuencia de tratamiento en función de los metales recuperar, pudiendo ser estos metales críticos, base o preciosos para su valorización.

Para ello, se han cumplido los siguientes objetivos específicos:

- Selección y caracterización de los residuos con contenido metálico a procesar entre las categorías de LIBS, RAEEES y plásticos metalizados, con objetivo de conocer composiciones de partida y poder evaluar las eficacias de los procesos de lixiviación y recuperación.
- Diseño y construcción de un prototipo para la extracción/recuperación de metales de residuos de elevado impacto como son residuos metalizados.
- Optimización de los procesos de lixiviación en función del tipo de residuo y su contenido metálico.
- Caracterización de los lixiviados y, forma y estado de los metales contenidos para su adaptación y posterior reutilización.
- Identificación y definición de protocolos y condiciones de operación que permitan adaptar los lixiviados para favorecer su posterior/inmediata reutilización.
- Desarrollar una comunicación, difusión y transferencia de los resultados obtenidos con el prototipo para favorecer su escalado e introducción de la metodología en una estrategia real de circularidad de metales.

2 Actividades realizadas, desarrollo del proyecto

A continuación, se muestra un resumen de los diferentes paquetes de trabajo desarrollados durante la ejecución del proyecto.

PT 1. Gestión y coordinación del proyecto.

Para ello se han realizado reuniones (presenciales y virtuales) entre el personal involucrado, así como con las diferentes empresas que han participado de manera directa o indirecta en el desarrollo de todas y cada una de las tareas, y que han permitido la obtención de los resultados de este.

Inicialmente se realizó una reunión con los participantes en el proyecto en fecha 14 de julio de 2023. Después, las personas con tareas de coordinación han ido coordinando todos los paquetes de trabajo y tareas técnicas y horizontales.

Ejemplo reunión de INICIO 14/07/2023: foto y slides de la presentación de inicio.



Reunión de inicio de proyecto

Slides de la presentación de inicio

Las reuniones realizadas tanto interna como con las empresas colaboradoras se han llevado a cabo con el fin de:

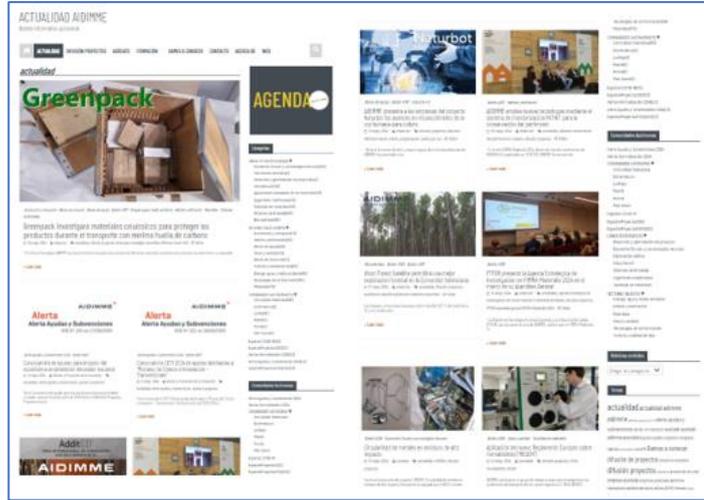
1. Orientar de manera integral la dirección y los propósitos del proyecto.
2. Armonizar y administrar de manera conjunta las actividades del proyecto.
3. Garantizar una cooperación, comunicación, intercambio de conocimientos y acuerdo apropiados entre los miembros del proyecto, asegurando el cumplimiento de los hitos establecidos, coordinando las acciones de los participantes a lo largo del tiempo y solucionando posibles conflictos entre las tareas y/o colaboradores.
4. Organizar y participar en las reuniones del proyecto, tanto con los técnicos involucrados como con las empresas colaboradoras.
5. Supervisar y mantener el control de la calidad del trabajo realizado en el proyecto, centrándose en los entregables de cada etapa para crear una documentación coherente y completa.
6. Facilitar los procedimientos y recursos necesarios para acelerar la aplicación de los resultados del proyecto y su difusión, garantizando una adecuada protección de la propiedad intelectual

PT 2. Difusión.

En esta tarea, AIDIMME ha llevado a cabo diferentes acciones de difusión de los resultados más relevantes obtenidos a lo largo de la anualidad y ampliación del proyecto. A continuación, se presentan algunos ejemplos de la difusión realizada:

Actualidad AIDIMME – publicación digital de actualización permanente sobre actualidad de I+D y el contexto sectorial.

Se trata de una publicación digital de acceso abierto, actualización permanente sobre actualidad de I+D y el contexto sectorial. El periódico digital Actualidad AIDIMME es un medio de comunicación de actualización permanente corporativo del Instituto Tecnológico dirigido a los ámbitos empresariales, científico-técnico, docentes y a la sociedad en general, dentro del ámbito de referencia del Instituto



Boletín actualidad AIDIMME

AIDIMME Instituto Tecnológico

ES | EN | PRINT

Sitio Información

FEDER CIMERA¹
CIMERA - CIRCULARIDAD DE METALES EN RESIDUOS DE ALTO IMPACTO

RESULTADOS OBTENIDOS

RESUMEN
El aumento en la demanda de los vehículos eléctricos, así como de los equipos electrónicos y electrónicos (AEE), implica la generación de una gran cantidad de residuos peligrosos al final de su vida útil además de suponer una importante pérdida de los recursos valiosos de los que se componen.
Este tipo de residuos se caracterizan por una composición variable, lo que hace compleja su valorización, pero también se caracterizan por tener un elevado contenido en metales de interés. Como estos metales, se encuentran metales primarios críticos (Al, Co, grafito, bauxita según listado 2023), los metales base (Cu, Al, Zn, Ni) y metales preciosos (Au, Ag, Pt, Pd), entre otros (tabla adjunta) los considerados como críticos para la UE. Metales del grupo platino.

En el presente proyecto de investigación se plantea el desarrollo de una metodología y creación de un prototipo capaz que incorpore distintos procesos de bajo impacto ambiental para la extracción secuencial de metales procedentes de residuos de alto valor añadido.

OBJETIVOS
El objetivo principal del proyecto es la atención de un piloto para la recuperación eficaz de metales a partir de residuos de elevado impacto. El piloto incluirá un avance de tecnologías hidrometalúrgicas como así lo la lixiviación, electrolisis y lixiviación sostenible para la valorización de metales residualizados. Durante la tecnología generará un horizonte para el tratamiento de residuos metalizados, se cuenta con referencias y trabajos previos realizados sobre residuos de metales de los flujos a través de proyecto RECERAT y BAES3 y pilotajes metalizados a través del proyecto LINEX.

NOTICIAS PUBLICADAS
https://actualidad.aidimme.es/2024/02/29/a-de-aidimme/

Relación de noticias publicadas

- NOTICIAS PUBLICADAS**
- Estado general**
https://actualidad.aidimme.es/2024/02/29/a-de-aidimme/...
https://actualidad.aidimme.es/2024/02/29/aidimme-rtm-4/...
https://actualidad.aidimme.es/2024/02/29/aidimme-rtm-1/...
https://actualidad.aidimme.es/2024/02/29/aidimme-rtm-2/...
https://actualidad.aidimme.es/2024/02/29/aidimme-rtm-3/...
https://actualidad.aidimme.es/2024/02/29/aidimme-rtm-4/...
https://actualidad.aidimme.es/2024/02/29/aidimme-rtm-5/...
https://actualidad.aidimme.es/2024/02/29/aidimme-rtm-6/...
https://actualidad.aidimme.es/2024/02/29/aidimme-rtm-7/...
https://actualidad.aidimme.es/2024/02/29/aidimme-rtm-8/...
https://actualidad.aidimme.es/2024/02/29/aidimme-rtm-9/...
https://actualidad.aidimme.es/2024/02/29/aidimme-rtm-10/...
- Estado medio**
https://actualidad.aidimme.es/2024/02/29/aidimme-rtm-11/...
https://actualidad.aidimme.es/2024/02/29/aidimme-rtm-12/...
https://actualidad.aidimme.es/2024/02/29/aidimme-rtm-13/...
https://actualidad.aidimme.es/2024/02/29/aidimme-rtm-14/...
https://actualidad.aidimme.es/2024/02/29/aidimme-rtm-15/...
https://actualidad.aidimme.es/2024/02/29/aidimme-rtm-16/...
https://actualidad.aidimme.es/2024/02/29/aidimme-rtm-17/...
https://actualidad.aidimme.es/2024/02/29/aidimme-rtm-18/...
https://actualidad.aidimme.es/2024/02/29/aidimme-rtm-19/...
https://actualidad.aidimme.es/2024/02/29/aidimme-rtm-20/...
- Estado avanzado**
https://actualidad.aidimme.es/2024/02/29/aidimme-rtm-21/...
https://actualidad.aidimme.es/2024/02/29/aidimme-rtm-22/...
https://actualidad.aidimme.es/2024/02/29/aidimme-rtm-23/...
https://actualidad.aidimme.es/2024/02/29/aidimme-rtm-24/...
https://actualidad.aidimme.es/2024/02/29/aidimme-rtm-25/...
https://actualidad.aidimme.es/2024/02/29/aidimme-rtm-26/...
https://actualidad.aidimme.es/2024/02/29/aidimme-rtm-27/...
https://actualidad.aidimme.es/2024/02/29/aidimme-rtm-28/...
https://actualidad.aidimme.es/2024/02/29/aidimme-rtm-29/...
https://actualidad.aidimme.es/2024/02/29/aidimme-rtm-30/...

PUBLICO OBJETIVO Y MEDICIÓN DE IMPACTO

SÍM Access a la web del proyecto
Nº Access a noticias publicadas en web propia.

Total Access: 7097

Sectores Destinatarios por CNAE

CNAE 2561 - Tratamiento y invernadero de metales - Nº de empresas objetivo: 108 (94 de la Comunidad Valenciana)
CNAE 261 - Fabricación de componentes electrónicos - Nº de empresas objetivo: 52 (27 de la Comunidad Valenciana)
CNAE 2720 - Fabricación de pilas y acumuladores eléctricos - Nº de empresas objetivo: 4 (2 de la Comunidad Valenciana)
CNAE 3822 - Tratamiento y eliminación de residuos pesados - Nº de empresas objetivo: 1 (1 de la Comunidad Valenciana)
CNAE 3831 - Separación y clasificación de materiales - Nº de empresas objetivo: 5 (3 de la Comunidad Valenciana)
CNAE 3903 - Actividades de documentación e impresión - Nº de empresas objetivo: 2 (1 de la Comunidad Valenciana)
CNAE 4671 - Comercio al por mayor de chatarra y papeles - Nº de empresas objetivo: 2 (1 de la Comunidad Valenciana)

EMPRESAS TRACTADORAS
JOSE JAREÑO, S.L.A.
SATE COMING, S.L.U.
RECYCLADOS RIBERA DEL JOQUER, S. L.

EMPRESAS INFORMAN PROYECTOS I+D
Sociedad consorcio de primera mano la evolución del proyecto, y sus avances hasta el resultado final.

EMPRESAS TRANSFERENCIA CONOCIMIENTO
transferencia tecnológica, desarrollo de estrategias e búsqueda nuevos modelos a partir de los resultados.

Relación de publicaciones

A continuación, se presenta un pequeño extracto de la difusión realizada en el proyecto.

Publicaciones genéricas		
MEDIO	ENLACE	N.º Boletín
ACTUALIDAD	https://actualidad.aidimme.es/2023/07/25/movilidad-inteligente-biomateriales-recuperacion-de-residuos-o-robotica-son-algunas-de-las-iniciativas-que-aidimme-desarrollara-hasta-2024-con-fondos-ivace-feder/	176
ACTUALIDAD	https://actualidad.aidimme.es/2024/01/10/https-actualidad-aidimme-es-category-especialproyectos2023/	187
ACTUALIDAD	https://actualidad.aidimme.es/2024/01/24/especial-proyectos-feder-2023-2024/	188
ACTUALIDAD	https://actualidad.aidimme.es/2024/02/13/participa-proyectos-feder-23-24-aidimme/	190
FACEBOOK	http://www.facebook.com/611045612382583/posts/770724378182937	176
FACEBOOK	http://www.facebook.com/611045612382583/posts/861228019132572	187
FACEBOOK	http://www.facebook.com/611045612382583/posts/870018881586819	188
FACEBOOK	http://www.facebook.com/611045612382583/posts/886370709951636	190
LINKEDIN	https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:7090570770057207808	176
LINKEDIN	https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:7151235110497927169	187
LINKEDIN	https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:7156548969022603264	188
LINKEDIN	https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:7166686473851715584	190
X	https://twitter.com/AIDIMME/status/1684804037797965824?s=20	176
X	https://x.com/AIDIMME/status/1745468425118322865?s=20	187
X	https://x.com/AIDIMME/status/1750782178076622971?s=20	188
X	https://x.com/AIDIMME/status/1760920385367728343?s=20	190

Publicaciones Específicas		
MEDIO	ENLACE	N.º Boletín
ACTUALIDAD	https://actualidad.aidimme.es/2023/07/20/cimerai-inicio/	176
ACTUALIDAD	https://actualidad.aidimme.es/2023/11/20/feder-23-24-ecofira/	183
ACTUALIDAD	https://actualidad.aidimme.es/2024/04/17/entrevista-laura-grima-en-el-marco-del-proyecto-lixmix/	194
ACTUALIDAD	https://actualidad.aidimme.es/2024/05/15/cimerai/	196
ACTUALIDAD	https://actualidad.aidimme.es/2024/05/28/aidimme-participa-con-sus-iniciativas-de-economia-circular-en-la-iv-edicion-del-congreso-smart-business/	197
ACTUALIDAD	https://actualidad.aidimme.es/2024/10/21/cimerai-culmina-dos-prototipos-de-distintas-tecnologias-sostenibles-para-extraer-y-recuperar-metales-de-residuos-de-alto-impacto/	205
FACEBOOK	http://www.facebook.com/611045612382583/posts/770726421516066	176
FACEBOOK	https://www.facebook.com/aidimme.InstitutoTecnologico/posts/pfbid02gPacMK6cTMLU42hAdUyADKHABtAEXRJWY7K4Afrdsd4coaiTVWJi5HqLjABoiFYGI	194
FACEBOOK	http://www.facebook.com/611045612382583/posts/935313128390727	196
FACEBOOK	http://www.facebook.com/611045612382583/posts/943985634190143	197
FACEBOOK	http://www.facebook.com/611045612382583/posts/1044031697518869	205
LINKEDIN	https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:7090571716850008064	176
LINKEDIN	https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:7186784343837577217	194
LINKEDIN	https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:7197129387572359168	196
LINKEDIN	https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:7202219375011983362	197
LINKEDIN	https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:7256652317117075456	205
X	https://twitter.com/AIDIMME/status/1684805631440564226?s=20	176
X	https://twitter.com/AIDIMME/status/1781026274271539436	194
X	https://x.com/AIDIMME/status/1791363190883783081	196
X	https://x.com/AIDIMME/status/1796453088196542972	197
X	https://x.com/AIDIMME/status/1850886039025434925	205

PT 3. Transferencia y promoción de resultados.

En esta tarea se han realizado acciones encaminadas a promover y transferir los resultados del proyecto a las empresas de la Comunitat Valenciana.

A lo largo del periodo de ejecución del proyecto se ha mantenido comunicación con empresas colaboradoras y agentes de la cadena de valor para informar de los avances alcanzados en el proyecto.

Se incluye en este apartado un listado con el nombre de la empresa y descripción de transferencia/comunicación realizada.

Empresas de la Comunitat Valenciana beneficiarias de la acción	Transferencia /acción de comunicación realizada
JOSÉ JAREÑO, S.A	Reunión inicial puesta en marcha del proyecto y explicación de las tareas a desarrollar por las empresas. Reunión on-line y presentación en Power point con los objetivos propuestos y potencialidades de sus residuos en el proyecto.
SATIS COATING, S.L.U	Recepción de muestras, residuos de plástico metalizado.
JOSÉ JAREÑO, S.A	Recepción de muestras de RAES para evaluación.
JOSÉ JAREÑO, S.A	Reunión en AIDIMME se muestra el piloto para recuperación metales y piezas aportadas por la empresa pretratadas
SATIS COATING, S.L.U	Reunión de seguimiento en AIDIMME se muestra el piloto para recuperación metales
RECICLADOS RIBERA DEL XÚQUER, S. L	Reunión en instalaciones de AIDIMME fallida. Correo con información del proyecto presentación de Power point.
RECICLADOS RIBERA DEL XÚQUER, S. L	Correo información finalización de proyecto CIMERAI
JOSÉ JAREÑO, S.A	Reunión en empresa para presentación resultados del testeo realizado a los residuos aportados por la empresa y entrega información de los pilotos desarrollados
SATIS COATING, S.L.U	Validación en empresa de sub productos metálicos extraídos con el piloto y tras acondicionamiento.
Empresas asociadas AIDIMME. Actualidad AIDIMME - Boletín N. 196	Noticia con resultados del proyecto https://actualidad.aidimme.es/2024/10/21/cimerai-culmina-dos-prototipos-de-distintas-tecnologias-sostenibles-para-extraer-y-recuperar-metales-de-residuos-de-alto-impacto/

- **Comunicación digital**

Los principales medios de comunicación han sido básicamente las siguientes:

- Medios corporativos AIDIMME; Boletines noticias y web AIDIMME (Blog Actualidad 176, 183, 187, 188, 190, 194, 196, 197, 205).
- Redes sociales. Facebook, Twitter, LinkedIn.

- **Ferias y congresos**

Así mismo ha sido presentado el proyecto en las Ferias HABITAT, ECOFIRA 2023, CONGRESO HÁBITAT 2024 y FIMMA + Maderalia. En estos eventos se ha realizado difusión mediante las fichas de proyecto presentes en el propio stand, bien en formato papel, bien en formato digital mediante código QR. También se han difundido vía cartelería y mediante el personal de AIDIMME presente en los eventos y atendiendo a las dudas del personal.

Evento	Fecha	Lugar	Audiencia
FIMMA + Maderalia	14-17/05/2024	Feria Valencia	35.000 visitantes
Ecofira	14-16/11/2023	Feria Valencia	12.686 visitantes (25% más que en 2021)
CONGRESO HÁBITAT	24/10/2024	Feria Valencia	Más de 200 asistentes
Feria Hábitat València	30/09/24 - 3/10/24	Feria Valencia	48.000 visitantes (edición 2023)

A continuación, se muestran resultados obtenidos en las tareas técnicas del proyecto para dar respuesta a los objetivos específicos propuestos en el mismo.

PT 4. Definición de línea base en la extracción de metales contenidos en residuos de alto impacto a través de tecnologías de bajo impacto ambiental.

A lo largo de este paquete de trabajo se ha definido la línea base para el diseño del prototipo de extracción de metales procedentes de residuos de elevado impacto. Se ha realizado una revisión y definición de la metodologías de extracción de metales, así como se el establecimiento de protocolos para la validación de los procesos de tratamiento para cada uno de los residuos.

Establecidos protocolos de trabajo en función del residuo y metales a extraer se han

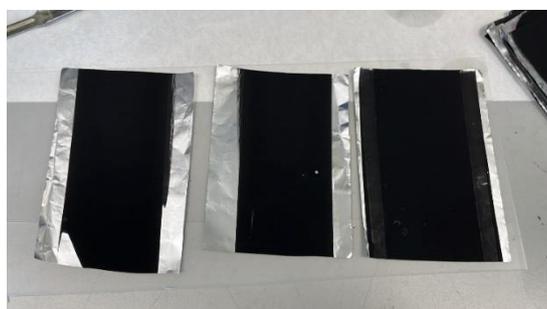
realizado ensayos a escala de laboratorio con los que validar las condiciones y parámetros operacionales para su utilización en el diseño y escalado de/los prototipo/s para la extracción/recuperación de metales, realizado en el siguiente paquete de trabajo PT5.

Residuos de Baterías

En el caso de los residuos de baterías de ion litio, el trabajo se inicia con la caracterización del material catódico sobre el que se aplicaron protocolos y realizado ensayos de electrolixiviación de metales. Para el cálculo de eficiencias de separación se realizó un análisis de composición de diferentes láminas de material catódico (NMC 811, NMC 365) sobre las que se trabajó.

Composiciones materiales catódicos

muestra	Li (mg)	Mn (mg)	Co (mg)	Ni (mg)	Al (mg)	total (mg-mg Al)	Li (%)	Mn (%)	Co (%)	Ni (%)
811 NMC	0,22	0,11	0,23	1,60	1,96	2,84	7,73	3,91	8,01	56,20
532 NMC	0,35	0,83	0,64	1,55	3,49	3,91	8,87	21,30	16,33	39,56



Aspecto materiales catódicos trabajados

Desarrollado protocolos y realizado los ensayos de validación sobre los residuos de LIBS se establecieron las condiciones para la separación y extracción de los metales presentes en las láminas catódicas de baterías de ion_{Li} siendo las siguientes:

Acondicionamiento-pretratamiento. Separación de lámina de Al.

- Ultrasonidos. Separación de lámina de Al.
- Sistema de filtración. Separación de C y material catódico desprendido.

Separación metales presentes en el material catódico (Li, Co, Mn, Ni)

- Electro-Lixiviación Li
- Electro-Lixiviación Ni, Co y Mn

Residuos de plástico metalizado, ABS

La recuperación de los metales extraídos del plástico metalizado se trabajó en el paquete de trabajo PT6.

- ABS: Se realizaron ensayos de validación, estudiando los parámetros y definiendo los procedimientos en vista del futuro escalado. Las condiciones para el tratamiento de los plásticos metalizados deben ser las siguientes:
 - Fe (III) y pH procedente de Bioleaching
 - Potencial 314 mV
 - Ratio S:L = Variable



Muestras iniciales para un estudio de lixiviación de ABS

Residuos de circuitos y material eléctrico

- Circuitos: Se realizaron ensayos de validación, estudiando los parámetros y definiendo los procedimientos en vista del futuro escalado. Las condiciones para una extracción rápida y efectiva de los metales contenidos en los circuitos, así como el protocolo secuencial:
 - Pretratamiento de los circuitos
 - Reactor compartimentado en configuración monopolar y modo galvanostático
 - 3 etapas de tratamiento cambiando lixiviante, durante 2 horas cada una.

PT 5. Diseño y construcción de un prototipo para la extracción de metales contenidos en residuos de alto impacto.

En el paquete de trabajo 5 se diseña y construye el prototipo versátil para la extracción y recuperación de metales de los residuos de elevado impacto recogidos en la propuesta de proyecto. La elección de los materiales, equipamiento de control y seguimiento de proceso, así como el diseño del prototipo se basó en resultados de ensayos de laboratorio realizados en tareas previas (PT4), así como características técnicas de cada tecnología involucradas en la metodología de trabajo desarrollada (electro-lixiviación, lixiviación, generación de oxidante electroquímicamente), secuencia de procesos a aplicar, cinéticas de reacción, parámetros de transferencia de masa y calor, dinámica de fluidos en interior de reactor y sistema, el comportamiento de fases y potenciales de metal en mezclas, etc. El prototipo debe ser capaz de trabajar a diferentes caudales, presiones, temperaturas y volúmenes de proceso, así como se requiere considerar en el diseño potenciales peligros con respecto a la seguridad.

Para la puesta en marcha de los prototipos para el tratamiento de residuos (baterías, residuos electrónicos y plásticos metalizados) se siguió la siguiente secuencia de trabajos:

- Diseño de los prototipos: diagramas de flujo, selección de materiales, selección de equipos, aplicación de parámetros de escalado, diseño en 3D.
- Montaje y construcción de prototipos.
- Desarrollo de protocolos de trabajo para la puesta en marcha de cada prototipo.
- Puesta en marcha de los prototipos: para la extracción de metales de LIBS y para extracción de metales de AEES y plástico metalizado.

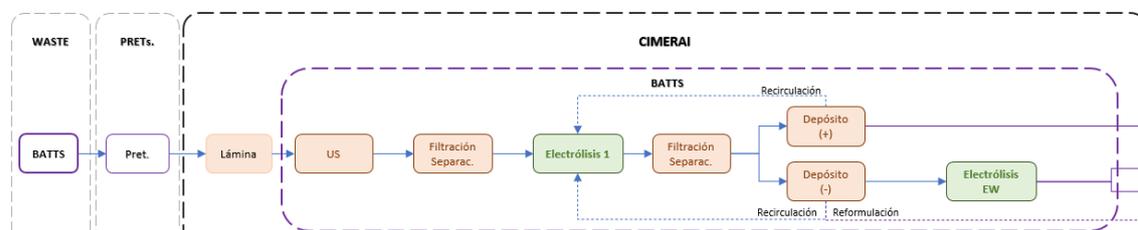
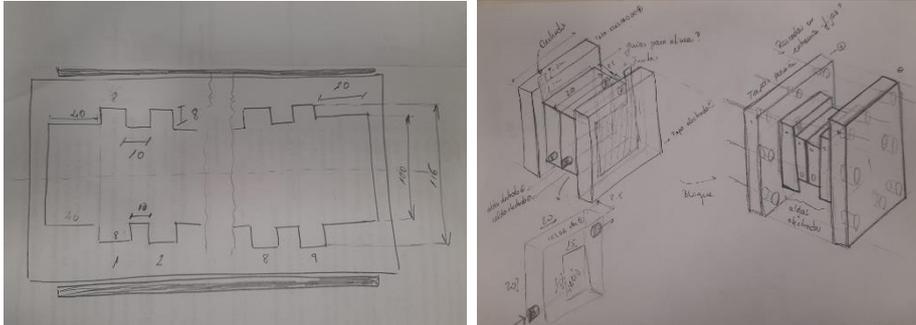


Diagrama de bloques para los residuos a procesar



Bocetos de las celdas desarrolladas para la recuperación de los residuos



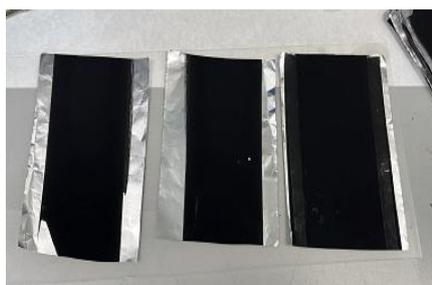
Prototipos desarrollados para el tratamiento de residuos

PT 6. Definición de línea base en la extracción de metales contenidos en residuos de metales en diferentes residuos de alto impacto.

En este paquete de trabajo se realizaron pruebas demostrativas con diferentes residuos de alto impacto tales como baterías, electrónicos o plásticos metalizados con objeto de validar las condiciones de operación establecidas en paquetes previos (PT4) aplicadas en los prototipos para la extracción de metales diseñados en el paquete PT5. Se ha tratado de comprobar si se mantienen los rendimientos de extracción de metales de los residuos de baterías (tipo NMC 811), identificando modificaciones de parámetros a fin de mantener eficiencias en la extracción de metales y establecer una metodología de tratamiento válida a cualquier escala de trabajo. La tarea es doble, optimizar parámetros y comprobar eficiencias a mayor escala de trabajo y por otra parte conocer el estado y calidad de los metales y los medios de electrolixiviación con objeto de optimizar procesos a fin de conseguir una ruta de recuperación de metales para su valorización. A continuación se indican resultados de los ensayos durante el pilotaje.

Residuos de Baterías

La **primera etapa del proceso de separación es el acondicionamiento y separación de la lámina de Al por ultrasonidos**. Para ello se recortaron y pesaron láminas intentando conseguir una relación S/L (g/L) en las celdas de electrolixiviación de > 5 g/L con objeto de minimizar la aplicación de operaciones de concentración.



Material catódico preparado para procesar por US

La selección de las condiciones óptimas se basa en la separación del metal de Al en lámina en una única pieza y permanencia del resto de metales que conforman el material activo despegado y con el contenido metálico (Ni, Co, Mn y Li) similar al material original.

Siguiendo el protocolo y parámetros operacionales establecidos se aplica secuencialmente la electro lixiviación anódica y posteriormente catódica. Para ello, en resumen:

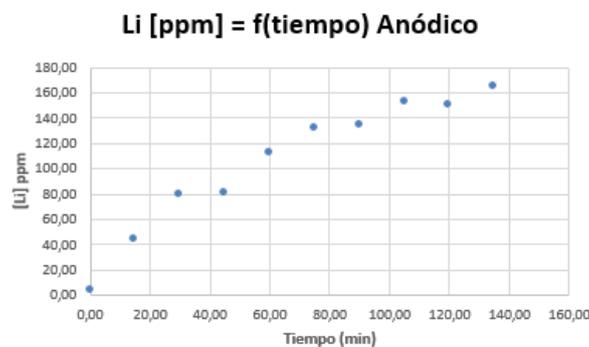
- Se coloca el material catódico sobre los electrodos y se colocan los marcos,
- Se procede a llenar depósitos de reactivos y medios lixiviantes,
- Se conecta la recirculación,
- Se procede a realizar las etapas de electro lixiviación el tiempo establecido,



Preparación de piloto para separar metales por electro lixiviación.

A continuación, se muestran gráficos donde aparecen las concentraciones de metales alcanzadas en los lixiviados (salino y ácido) como resultado de las etapas de electro lixiviación secuencial.

Electro lixiviación configuración anódica



*Gráfico de concentración de metales en función del tiempo durante proceso electro lixiviación en configuración anódica.
[Li]= f(tiempo)*

Electro lixiviación configuración catódica

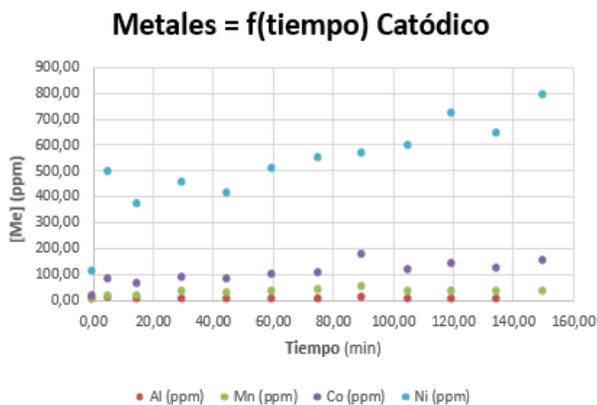


Gráfico de concentración de metales en función del tiempo durante proceso electro lixiviación en configuración catódica. [Ni, Co, Mn]=f(tiempo) a la derecha

Se alcanzaron eficiencias de separación del litio del 56 % en la primera etapa y del 64 % para el Ni, 83 % para el Co y un 33 % para el Mn en la segunda etapa del proceso de electro lixiviación sin llegar a los rendimientos previstos (escala de laboratorio) de entre 80_90 %.

Por otra parte, los medios de lixiviación salino (configuración anódica) y ácido (configuración catódica) mantienen las condiciones lixiviantes para ser reutilizados hasta en 4-5 ciclos.

Trabajar por ciclos utilizando el mismo medio de electro lixiviación mejoraría sin duda la eficacia de los procesos de recuperación posteriores.

Residuos de Circuitos y ABS

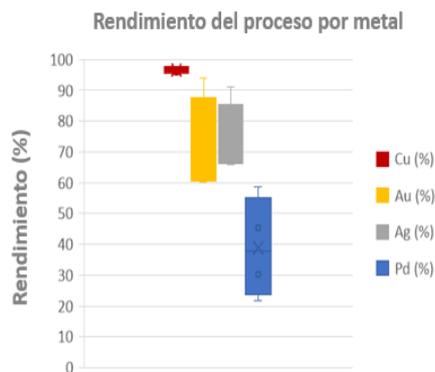
El objetivo es la extracción máxima de metal y determinar el rendimiento de extracción de los metales en un tiempo determinado, sin cambio de disolución y para un mismo lote de residuo. De esta manera, se puede comprobar la reproducibilidad del comportamiento del sistema a pequeña y gran escala. Para ello, se han preparado los equipos tal y como se describe en el entregable 5 (montaje del sistema, pesado y llenado de residuos, introducción de la membrana, conexiones y comprobación de la estanqueidad). De los ensayos realizados en la definición de la línea base, se establece una distinción entre la extracción de los metales preciosos y los metales base. Se definen etapas diferenciadas para poder extraer de manera preferencial cada uno de los metales, teniendo distintas disoluciones en base al componente mayoritario disuelto. El objetivo de este conjunto de ensayos es reutilizar las disoluciones de lixiviación para tratar distintos lotes de residuos. Otro de los objetivos es comprobar la capacidad de reutilización de la disolución lixivante, ya que la cantidad de cloruros iría disminuyendo tras cada etapa. Para comprobar el número de ciclos que estos se podrían reutilizar, se realizan ensayos de concentración donde la misma disolución de cada etapa se reutiliza en diversos ciclos. Esto se realiza con el fin de determinar si estas poseen poder de extracción, ser capaces de reutilizar el electrolito (y maximizar el potencial del proceso) así como concentrar las distintas disoluciones con el fin de facilitar posteriores procesos de extracción.



Equipo durante los ensayos de lixiviación

Se realizaron pruebas de lixiviación y ensayos de optimización de insumos, se obtuvo como resultado la concentración de los metales procedentes de hasta 5 lotes diferentes, haciendo pasar las 3 etapas diferentes en cada lote. La extracción

mayoritaria de cobre tiene lugar en la primera etapa, mientras que los metales preciosos se concentran en las etapas 2 y 3 del proceso. La recuperación de estos metales se estudia en el PT7 del presente proyecto. El rendimiento máximo de extracción para cada metal al final del proceso global fue, respectivamente para el Cu, Au, Ag y Pd de 98%, 94%, 90% y 67%. Se consigue proponer un sistema de lixiviación basado en tecnologías electrolíticas, empleando una disolución no concentrada de ácido, en tiempos razonables y a temperatura ambiente.



Rendimiento global del proceso para Cu, Au, Ag y Pd

PT 7. Alternativas de valorización de metales de valor añadido extraídos de residuos de alto impacto

El paquete de trabajo PT7 tiene como objeto identificar potenciales desarrollos para la valorización y/o recuperación de metales extraídos y presentes en los lixiviados independiente de su estado (metálico, óxido o en forma de sal). Para ello los metales extraídos se pueden transformar en distintos subproductos de utilidad industrial en forma de sales, óxidos o metal.

Se han definido protocolos y/o rutas de trabajo que permiten establecer directrices para la valorización final de los metales extraídos como subproductos.

Residuos de Baterías

Durante esta etapa se han trabajado metodologías de adaptación de los metales presentes en los lixiviados para su posible valorización como subproductos en concreto en el caso de los materiales extraídos del material catódico como precursores reciclados para la síntesis de nuevo material catódico activo.

En la línea de lo perseguido se han desarrollado las siguientes tareas en orden:

- Identificación de rangos de concentración en función del metal a recuperar para aplicación de metodologías de recuperación.

- Determinación de tecnologías de concentración para alcanzar las condiciones y concentraciones para la recuperación de metales por coprecipitación.
- Determinación de impurezas metálicas (Al, Fe, etc.) y aniónicas que interfieren en las fases y o composiciones finales.
- Preparación de protocolos de adaptación de metales para aplicación sobre los medios de lixiviación obtenidos en ensayos realizados durante el proyecto (escala laboratorio PT4 y pilotaje PT6).
- Pruebas de concepto. Aplicación de los protocolos preparados sobre lixiviados salinos con objeto de obtener precursores reciclados de Li.
- Aplicación de los protocolos preparados sobre lixiviados ácidos con objeto de obtener precursores reciclados de metales Ni, Co y Mn.
- Caracterización de composición, estructura y morfología de los materiales y/o precursores reciclados obtenidos.



Imagen precursores reciclados de Ni, Co, Mn y Li.

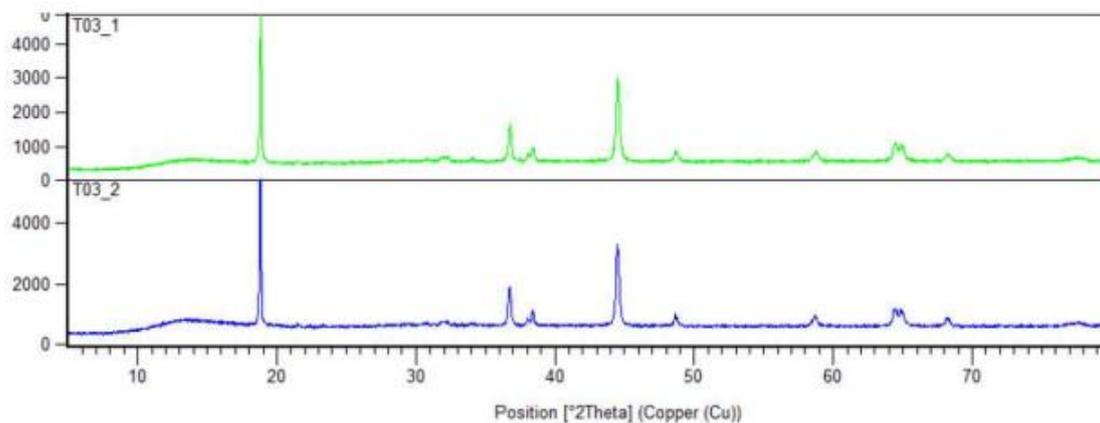
A continuación, en este paquete de trabajo se **sintetizaron materiales activos catódicos de tipo NMC811 a partir de los precursores reciclados y obtenidos en pruebas de concepto** junto con precursores estándar con el objetivo de alcanzar la estequiometría 811. En paralelo, se realiza una síntesis de referencia con precursores estándar para poder establecer una comparativa entre materiales. Este trabajo de síntesis de materiales fue subcontratado al ITE.

Cátodo	Precursores reciclados		Precursores estándar			
	Fuente de óxidos de Ni, Co y Mn-	Fuente de Li	NiO (g)	MnO (g)	CO ₃ O ₄ (g)	Li ₂ CO ₃ (g)
T01_1	-	-	SI	SI	SI	SI
T01_1	-	-	SI	SI	SI	SI
T01_2	ME-ITE-240677-	ME-ITE-240677-02	SI	-	SI	-

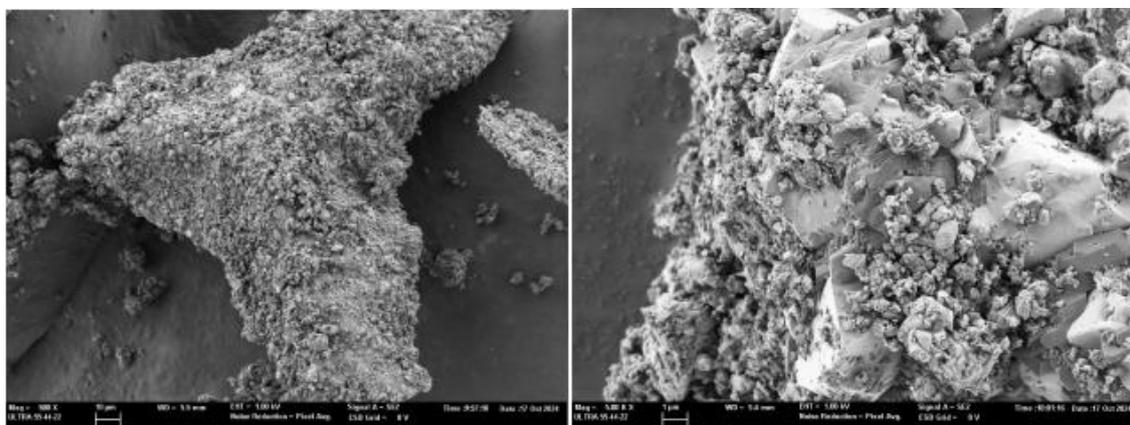
	01					
T01_2	ME-ITE-240677-01	ME-ITE-240677-02	SI	-	SI	-
T01_3	ME-ITE-240677-03		SI	SI	SI	SI
T01_3	ME-ITE-240677-03		SI	SI	SI	SI

Materiales sintetizados y precursores empleados en cada caso

Los materiales una vez sintetizados fueron caracterizados para evaluar si se obtuvieron los materiales con la composición y estructura objetivo. Se caracterizaron, para ello, mediante SEM- EDX y DRX. Se llevó a cabo también la medida de la densidad ya que se trata de una característica que tiene un impacto importante tanto en el desarrollo de los slurries como en el posterior rendimiento electroquímico de los materiales.

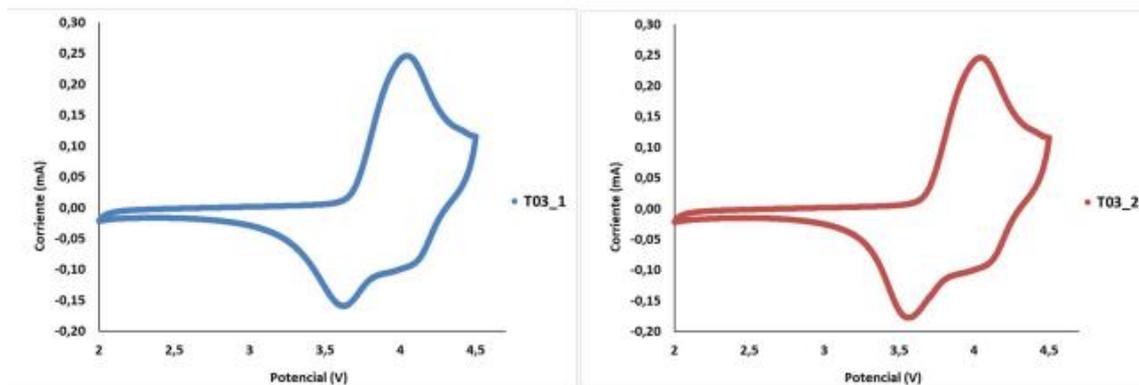


Difractogramas de los materiales T03_1 (arriba) y T03_2 (abajo)



Imágenes tomadas por SEM-EDX muestra T03_01

Finalmente, con el objetivo de caracterizar electroquímicamente los materiales se desarrollaron electrodos que posteriormente se integran en semicelda. Se determinaron, en este caso, tanto la impedancia electroquímica (EIS), como la voltamperometría cíclica (CV) y la capacidad para evaluar el rendimiento electroquímico de los materiales frente al material de referencia.



Voltamperometría cíclica de un ciclo de las muestras T03_1 (izquierda) y T03_2 (derecha)

Los resultados de las evaluaciones realizadas a los materiales activos sintetizados a partir de los precursores reciclados ponen de manifiesto la importancia de la pureza de los precursores en la síntesis de materiales catódicos dado que, aunque se añadan precursores estándar para tratar de alcanzar la estequiometría deseada, la mera presencia de las impurezas afecta de manera negativa al rendimiento electroquímico.

Y la necesidad de seguir investigando y trabajando en la línea de adaptar, recuperar y purificar los metales para su posible valorización como subproductos. Es un recorrido largo, ya se conoce ruta para la extracción requiriéndose más esfuerzos en la búsqueda de desarrollos que permitan el refinado de los metales extraídos a fin de ser utilizados como precursores en la síntesis de nuevos materiales catódicos

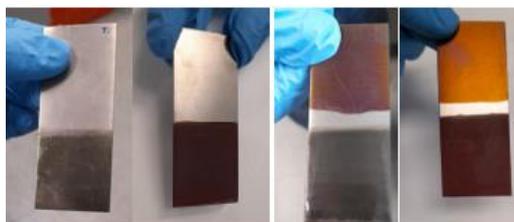
Residuos electrónicos y ABS

Durante esta etapa de recuperación de los metales disueltos en el proceso, se plantean diferentes ramas:

- Determinación y recuperación de los metales no disueltos
- Electrodeposición preferencial del Cu en la mezcla obtenida
- Estudio de deposición preferencial de metales preciosos
- Separación y concentración de los metales preciosos
- recuperación del Cu del ABS

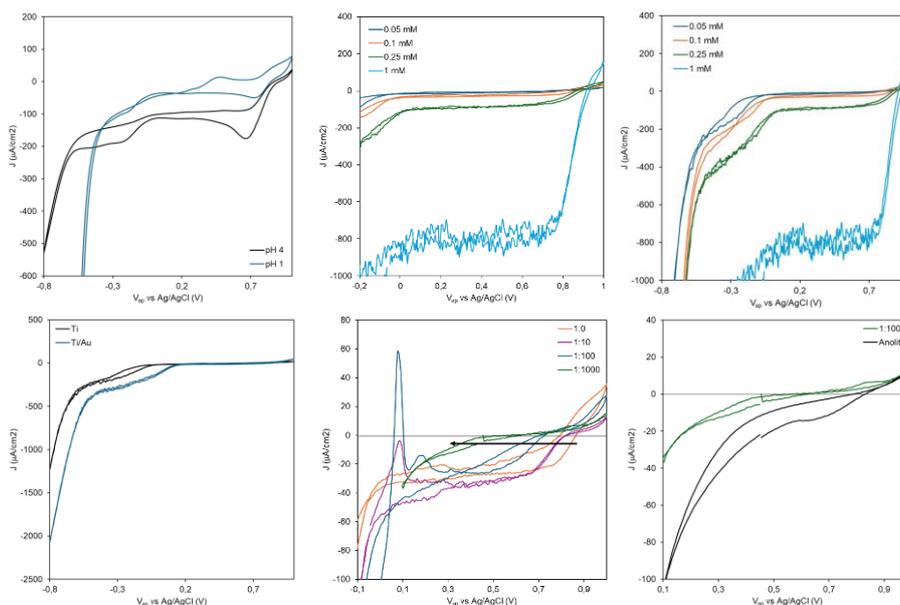
La alternativa para recuperar el cobre a partir de la disolución obtenida en la primera etapa del proceso, se propone una electrodeposición del mismo. Para ello, se debe

conocer el potencial de trabajo para realizar el ensayo de forma específica intentado evitar el resto de los metales. Para ello, se realizan voltametrías en las mismas condiciones que la deposición, estudiando distintas composiciones.



Depósitos obtenidos en el cátodo para cada estudio

En ella se puede observar el comportamiento del sistema tras la adición de cobre (I) y (II), en especial la adición de cobre (II) en medio ácido tal y como se encuentra en el lixiviado. Observando el pico de la reducción, se deduce el potencial de electrodo al que se debe trabajar en los ensayos de electrodeposición. Para calcular el rendimiento de la deposición durante el tiempo de ensayo, Empleando la Ley de Faraday, se calcula que la cantidad teórica depositada en ese tiempo es de 0.71g de Cu, por lo que con los gramos medidos tanto por diferencia de peso así como por el análisis del depósito disuelto se ha obtenido un rendimiento eléctrico para el Cu cercano al 60% y una pureza del depósito superior al 96%. El estudio de electrodeposición preferencial de metales preciosos se realiza en celda compartimentada con potenciostato-galvanostato Autolab PGSTAT 302N, variando las concentraciones de los distintos metales en disolución.



Algunas curvas de los ensayos realizados a diferentes composiciones y concentraciones

Gracias a estos ensayos, se ha podido confirmar la hipótesis de separación y especificar un rango de parámetros mínimo/máximo necesario para el trabajo, demostrando los límites a partir de los cuales no tiene sentido realizar esta separación o parar el proceso. Debido a esto, se puede plantear la siguiente estrategia; en primer lugar evitar la presencia de cobre en la disolución, estrechando el compromiso entre el rendimiento de extracción y la selectividad el Cu y por otro lado la necesidad de separar y/o concentrar ambos metales; Se deben estudiar tecnologías de separación como por ejemplo agentes reductores (precipitantes) específicos, resinas de intercambio o electrodiálisis con el fin de modificar el ratio Au:Cu. Antes o después de esta separación, se debe plantear la concentración de la disolución para favorecer la extracción de los metales.

3 Resultados

Como resultado de la ejecución de las actividades realizadas en el proyecto se ha:

- Diseñado, construido y realizado el pilotaje de dos prototipos versátiles basados en tecnologías electro-hidrometalurgia que permiten la extracción de metales de residuos de alto impacto. Un piloto para la extracción de metales de material catódico de baterías de ion-Litio (LIBS) y un segundo para la extracción de metales de residuos de equipos electrónicos (AEE) y plástico metalizado (ABS).
- Desarrollado y validado metodologías competitivas para el tratamiento y recuperación de los principales metales contenidos en los residuos procesados y, que contienen metales, en su mayoría aportados por empresas colaboradoras.
- Identificado potenciales desarrollos para la valorización y/o recuperación de los metales extraídos y presentes en los lixiviados obtenidos en los prototipos.
- Difundido los avances y los resultados del proyecto a las empresas colaboradoras e interesadas a través de RRSS y boletines propios de AIDIMME (Actualidad).
- Realizado transferencia y promocionado los resultados generados en el proyecto a las empresas colaboradoras y partes interesadas.

4 Conclusiones

Como conclusión, con el proyecto CIMERAI se han desarrollado metodologías y construido prototipos versátiles que incorporan distintos procesos basados en tecnologías electroquímicas de bajo impacto ambiental para la extracción de metales procedentes de residuos de alto valor añadido.

Tras las pruebas de validación llevadas a cabo sobre diferentes residuos entre los que se encuentran: el material catódico de baterías de ion-Litio (en lámina), circuitos de equipos electrónicos y plásticos metalizados y, obtenido lixiviados con contenidos metálicos se han identificado las siguientes áreas de trabajo:

- Identificar tecnologías de concentración que permitan conseguir lixiviados con mayor concentración metálica favoreciendo su recuperación en condiciones de pureza que permitan ser reformulados y reutilizados como precursores reciclados en la preparación de nuevos cátodos, en el caso de material catódico.
- Realizar una preselección y pretratamiento específico que permita separar y concentrar el contenido en metales valiosos por parte de los residuos electrónicos. La elevada complejidad de estos residuos sumada a la importancia económica y escaso conocimiento actual sobre su gestión, hacen del tratamiento de estos materiales una prioridad para la sociedad.

Es crucial seguir trabajando en la investigación y preparación de protocolos de adaptación, recuperación y purificación de metales presentes en los diferentes medios de lixiviación. La búsqueda de estrategias de recuperación de los metales presentes en los lixiviados ya sea coprecipitación, electrodeposición, sol-gel, etc. son indispensables para conseguir una total circularidad de los metales extraídos de los residuos.

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 —

Leonardo Da Vinci, 38 (Parque Tecnológico)
46980 Paterna. Valencia (España)
Tlf. 961 318 559 - Fax 960 915 446

aidimme@aidimme.es

www.aidimme.es